



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA EL REFUERZO CON GEOSINTÉTICOS DE LAS PLAZAS DEL APARCAMIENTO EXPERIMENTAL DE LA UC EN EL PARQUE DE LAS LLAMAS.

Trabajo realizado por:

Coral Cossío Abascal

Dirigido:

Jaime Carpio García

Jorge Rodríguez Hernández

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, septiembre de 2019.

TRABAJO FIN DE GRADO

Tabla de contenido

1.1.	ANTECEDENTES	4
1.2.	OBJETIVOS	5
1.3.	FUNDAMENTOS DE LOS GEOSINTÉTICOS	6
1.3.1.	DEFINICIÓN DE GEOSINTÉTICO	6
1.3.2.	FUNCIONES DE LOS GEOSINTÉTICOS	6
1.3.3.	TIPOLOGÍA DE GEOSINTÉTICOS	9
2.1.	REPASO A LA NORMATIVA DE CONSERVACIÓN DE FIRMES	12
2.2.	APLICACIÓN DE GEOSINTÉTICOS EN FIRMES	14
2.3.	METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE GEOSINTÉTICOS EN CAPAS DE FIRME	16
2.3.1.	Metodología de diseño para geotextil tejido o geomalla	16
2.3.2.	Metodología de diseño para geoceldas	20
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL CASO PRÁCTICO	22
3.1.1.	UBICACIÓN DEL CASO PRÁCTICO	22
3.1.2.	DESCRIPCIÓN DE FIRME Y CONDICIONES.....	27
3.1.2.1.	Mezcla bituminosa drenante (C) y hormigón poroso (D).....	27
3.1.2.2.	Césped reforzado mediante celdas de plástico (F)	28
3.1.2.3.	Césped reforzado con celdas de hormigón (E)	30
3.1.2.4.	Adoquines Hanson-Formpave (A) y Montserrat (B).....	31
3.1.3.	ANÁLISIS DE FALLOS	33
3.2.	ESTUDIO DE REFUERZO	34
3.2.1.	ALTERNATIVAS VALORADAS.....	35
3.2.1.1.	Alternativa cero: no actuación.	35
3.2.1.2.	Alternativa uno: geosintéticos.	35
3.2.1.3.	Alternativa dos: hormigón poroso	41
3.2.2.	COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS	44
	Celda de drenaje Atlantis 52 mm de espesor:	45
	Hormigón poroso	47
3.3.	PROPUESTA FINAL DE ACTUACIÓN	48
3.3.1.	DESCRIPCIÓN	48
3.3.2.	UNIDADES DE OBRA	50
3.3.3.	ESTIMACIÓN ECONÓMICA	58
3.4.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	60

Bibliografía	63
Trabajos citados	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El presente trabajo de fin de grado se encuadra en los TFG de finalización del grado en Ingeniería Civil, Mención de Construcción Civil. La definición del TFG recogida en la normativa es la siguiente:

"El TFG consistirá en la realización por parte del estudiante de un trabajo original, autónomo y personal, bajo la dirección de un profesor, en el que se apliquen y desarrollen los conocimientos, capacidades y competencias adquiridas a lo largo de la titulación". (Junta de Escuela, 2016)

De la misma forma, en la normativa se recogen las distintas tipologías de TFG:

"El TFG atenderá a una de las siguientes tipologías: proyecto constructivo clásico, proyecto básico y estudio o trabajo sobre cualquier aspecto de la ingeniería civil". (Junta de Escuela, 2016)

Por tanto, este trabajo de fin de grado quedaría enmarcado en el grupo de proyectos básicos, a los que la normativa se refiere de la siguiente manera:

"Se considerarán proyectos básicos, por ejemplo, los estudios de alternativas de trazado, estudios de viabilidad económica de obras, estudios informativos, etc... Su carácter de básico hace innecesario profundizar como en un proyecto constructivo clásico, pero exigen un esfuerzo mayor en los aspectos específicos de dicho proyecto básico, como estudios de alternativas o estudios económicos". (Junta de Escuela, 2016)
Dentro de dicha subclasificación otorgada a los proyectos básicos, este TFG queda en concreto catalogado como Estudio de Alternativas.

Debido al carácter del trabajo de fin de grado, han sido precisos para su desarrollo diversos conocimientos adquiridos en las asignaturas: Caminos; Maquinaria, equipos y plantas; Impacto Ambiental; Geotecnia; Geotechnical Works; Hidráulica e Hidrología; y Sostenibilidad en la construcción.

Dado que el aparcamiento objeto del trabajo pertenece a la Universidad de Cantabria, este estudio tiene como antecedentes diversos Trabajos de Fin de Grado y Tesis Doctorales realizados en dicha universidad, en la ETS de Ingenieros de Caminos, Puertos y Canales. Los trabajos de estos antiguos alumnos y doctorandos nos proporcionan información sobre el método constructivo y las soluciones adoptadas para la realización del aparcamiento mediante firmes permeables, y sobre la evolución de su estado.

En primer lugar cabe destacar una tesis doctoral, 'Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana' (Valeri, 2017) centrada en los SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) y en el funcionamiento hidrológico de los firmes permeables, tanto en laboratorio como en la situación real.

En referencia a la reparación de los errores encontrados en el aparcamiento experimental, podemos encontrar el TFG titulado *“Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de Las Llamas, Santander”* (García Perales, 2014) en el que se analizan los defectos debidos a la propia fase de construcción y a la fase de utilización de las plazas de aparcamiento, y se realiza un repaso a las características y utilidades de los firmes permeables.

De la misma forma, gran parte de la información sobre el aparcamiento y sobre los geosintéticos utilizados se ha obtenido de la página oficial del grupo de investigación GITECO, que forma parte de la misma Universidad de Cantabria y consta de varias líneas de investigación, entre las que se encuentran la ‘Aplicación de geosintéticos en la construcción’, y la ‘Construcción de sistemas de drenaje sostenibles’.

1.2. OBJETIVOS

La principal finalidad de este TFG es analizar las aplicaciones de refuerzo de firmes con geosintéticos, estudiando el caso práctico del aparcamiento de firmes permeables del parque de las Llamas.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- ❖ Repasar las principales características de los geosintéticos.
- ❖ Analizar la aplicación de los geosintéticos en los refuerzos de carreteras.
- ❖ Diagnosticar el estado actual del área seleccionada como caso práctico.
- ❖ Plantear y calcular distintas alternativas de refuerzo.
- ❖ Seleccionar, discutir y concluir.

La estructura del trabajo es, por tanto, la de un estudio de alternativas, con una parte introductoria sobre los geosintéticos, en la que se explicarán sus funciones, diversos usos y su aplicación en firmes; y una segunda parte en la que se entrará en detalle sobre los problemas y las posibles soluciones para el caso práctico del aparcamiento experimental de firmes permeables del parque de Las Llamas.

Cabe destacar que aunque el tema principal es el uso de geosintéticos en el refuerzo de firmes, se valorarán todas las alternativas viables, incluyendo aquellas que no contemplen dichos materiales en su solución. Las soluciones podrán variar en función del tipo de firme y base.

1.3. FUNDAMENTOS DE LOS GEOSINTÉTICOS

1.3.1. DEFINICIÓN DE GEOSINTÉTICO

Los materiales geosintéticos son generalmente fabricados a partir de derivados del petróleo, mediante la transformación industrial de polímeros que son procesados con el fin de obtener láminas, fibras, tejidos, películas o mallas. Existen también combinaciones con materiales de origen vegetal, como en el caso de las soluciones con arcilla expansiva. Esta definición de elaboración propia se basa en las acepciones obtenidas del International Geosynthetic Society (IGS), así como de las normativas europeas y americanas enumeradas en el apartado Repaso a la normativa de conservación de firmes.

Los geosintéticos se relacionan con aplicaciones en ingeniería civil y geotécnica, geoambiental, hidráulica y de transporte. Esto significa que participan como parte integral de sistemas y estructuras que utilizan materiales de construcción tradicionales.

Sus funciones en estas estructuras son complementar, conservar, o bien mejorar el funcionamiento de los sistemas constructivos e incluso sustituir por completo algunos materiales y procesos de la construcción tradicional. Aunque sus funciones y combinaciones son muy variadas, cabe destacar el objetivo general de todos los materiales geosintéticos, que es mejorar el comportamiento y economía de los diseños constructivos, por encima de las soluciones tradicionales.

Esto implica un amplio horizonte de nuevas posibilidades, muchas de las cuales aún están en pleno proceso de investigación, por lo que su uso no siempre se ve reflejado en las normativas aplicables.

Los usos más comunes de este tipo de materiales son los de refuerzo de tierra, anticontaminación, redistribución de esfuerzos, separación, filtración, drenaje, control de la erosión, control de la permeabilidad, etc. En el apartado siguiente se repasan las principales funciones, contempladas por el International Geosynthetic Society (IGS).

1.3.2. FUNCIONES DE LOS GEOSINTÉTICOS

Existen seis funciones básicas según el IGS, aunque a menudo los geosintéticos cuentan con combinaciones y derivados de estas mismas funciones.

- ❖ SEPARACIÓN: se evita la mezcla de dos materiales o estratos con diferente distribución de partículas, evitando su contaminación y preservando sus cualidades físicas y mecánicas. Esto se consigue mediante geosintéticos porosos y flexibles.

De esta forma, los geotextiles se usan para evitar que los materiales de base penetren en suelos blandos, manteniendo su espesor de diseño, y como

separadores para evitar el traspaso de finos en dirección de los estratos granulares permeables.

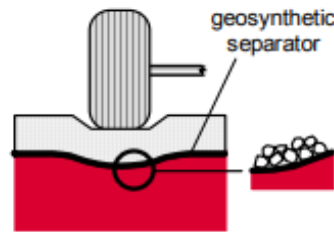


Ilustración 1. Función separadora

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Functions)

- ❖ **FILTRACIÓN:** se permite el paso de fluido entre dos estratos diferentes gracias a geosintéticos porosos, flexibles y permeables, evitando a la vez la migración de finos y la contaminación de los estratos, aun bajo carga o compresión. De esta forma se permite mantener el flujo a través del sistema, evitando a su vez la erosión debida al mismo de los diferentes estratos, y la posible obstrucción de los elementos de drenaje.

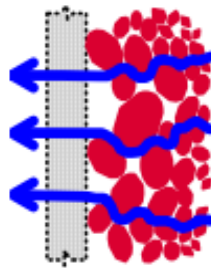


Ilustración 2. Función filtrante

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Functions)

- ❖ **DRENAJE:** se permite un régimen de flujo entre dos estratos aun estando sometido a trabajos de carga o compresión. Es decir, el geosintético actúa como dren a través de suelos menos permeables, con el fin de disipar las presiones en la base de los terraplenes, o como drenes de canto en pavimentos.

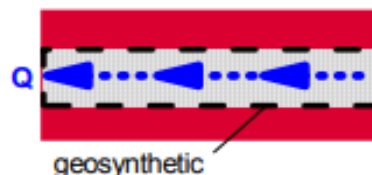


Ilustración 3. Función drenante

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Functions)

- ❖ **REFUERZO:** se aumenta la capacidad de carga del terreno obteniendo una superficie más estable, mediante la interacción o fricción de los geosintéticos que permite una mejor distribución de cargas y aumenta las propiedades de resistencia y deformación de un suelo sin refuerzo.

Estos geosintéticos de refuerzo permiten construir sobre suelos muy blandos, o superar los vacíos que se pueden desarrollar bajo capas granulares que soporten cargas (en carreteras o ferrocarriles).

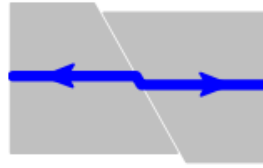


Ilustración 4. Función de refuerzo

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Functions)

- ❖ CONTENCIÓN DE FLUIDOS (BARRERA O IMPERMEABILIZACIÓN): hacen de barrera impermeable frente a fluidos (líquidos o gases). De esta forma, usamos geomembranas, revestimientos de arcilla geosintética (GCL) y geotextiles revestidos con películas delgadas, para impedir el paso de fluidos, lo que resulta útil en recubrimientos de pavimentos y en la contención de residuos.

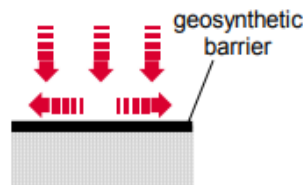


Ilustración 5. Función de barrera

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Functions)

- ❖ CONTROL DE EROSIÓN: el impacto de la lluvia y el paso de las aguas superficiales puede provocar la erosión del suelo, lo que se puede evitar mediante el uso de barreras para la retención de las partículas, en superficie y expuestas en las pendientes.

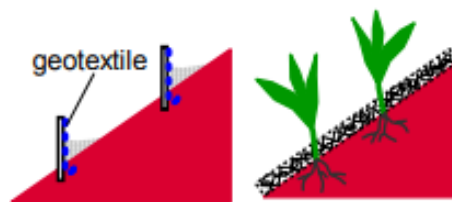


Ilustración 6. Función de control de erosión

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Functions)

Los geosintéticos también tienen otros usos relacionados o derivados de los anteriormente redactados. De forma habitual se usan en asfalto, refuerzo de pavimentos y en estratos de amortiguación, de manera que se evita la punción de las geomembranas por el suelo adyacente mediante la reducción de presión en los puntos de contacto.

1.3.3. TIPOLOGÍA DE GEOSINTÉTICOS

De forma general, el IGS clasifica los geosintéticos en función de su método de manufactura, aunque existen distintas formas de catalogación según la fuente que se consulte. La siguiente clasificación es una combinación de las del IGS y de *Designing with Geosynthetics* (M. Koerner, 2012), así como las propias de marcas comerciales como Geotexan o Texdelta.

Los tres tipos más habituales son los geotextiles, geomallas y geomembranas:

- ❖ **GEOTEXTILES**: son textiles en el sentido tradicional pero fabricados a partir de fibras sintéticas como el polipropileno o el poliéster, lo que evita el problema derivado de la biodegradación.
Se clasifican en geotextiles tejidos (woven) de forma convencional, formando tejidos porosos y flexibles, y no tejidos (non-woven), disponiendo las fibras de forma aleatoria.

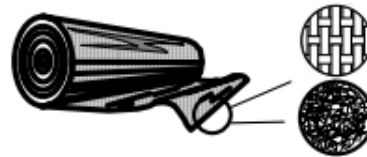


Ilustración 7. Geotextil

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Classification)

La porosidad de estos tejidos permite el flujo del líquido a través del plano y también dentro de su propio espesor, aunque con un gradiente variable.

Se aplican directamente sobre suelo, roca o cualquier material térreo, ya que son capaces de retener partículas de suelo mayores que el tamaño de sus poros, permitiendo la filtración y drenaje, y conteniendo la erosión.

Los geotextiles siempre llevan a cabo al menos una de estas cuatro funciones: separación, refuerzo, filtración y/o drenaje. Sus aplicaciones más usuales en firmes son las de drenaje subsuperficial, estabilización de vías, suelos mecánicamente estabilizados (MSE) y capas de reasfaltado.

- ❖ **GEOMALLAS**: son estructuras compuestas de filamentos, con espaciados entre los mismos. Son generalmente fabricadas con polietileno de alta densidad mediante un proceso de extrusión (una sola pieza), o bien tejidas o soldadas. Son entonces sometidas a un proceso de estiramiento monodireccional (en el caso de las uniaxiales), o de estiramiento longitudinal y transversal (en el caso de las bi y triaxiales).

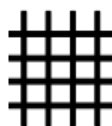


Ilustración 8. Geomalla

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Classification)

Gracias a la combinación de este entramado con un elemento de relleno se obtiene un trabajo de tensión que permite aumentar la capacidad de carga de un terreno mediante la distribución de cargas.

Por esta razón, su aplicación es común en el incremento de la capacidad de carga, así como en refuerzo de caminos (pavimentados y no pavimentados).

- ❖ **GEOMEMBRANAS**: son láminas flexibles poliméricas fabricadas con un polímero termoplástico. Son relativamente impermeables, por lo que se utilizan como revestimiento de superficies frente a fluidos y partículas, a fin de contener materiales o sustancias y prevenir el flujo de líquidos fuera o hacer de barrera para vapores, y como control de la erosión.



Ilustración 9. Geomembrana

Fuente: (International Geosynthetic Society, Geosynthetic Classification)

Además de estos tres tipos fundamentales podemos encontrar:

- ❖ **GEOREDES**: son materiales de espaciado amplio formados por dos grupos de hebras poliméricas extruidas, paralelas y formando un ángulo constante. De esta forma crean una estructura tridimensional con un área hidráulica (o porosidad) que permite flujo de fluidos entre dos estratos a compresión. Cuando los nervios son espaciados, y la apertura es suficientemente grande, permiten el drenaje de líquidos de todo tipo.



Ilustración 10. Geored

Fuente: (International Geosynthetic Society, Geosynthetic Classification)

- ❖ **GEOCOMPUESTOS**: son la unión de dos o tres geosintéticos, o en el caso de los GCL la unión de un geotextil con una arcilla expansiva. Existen diversas combinaciones (geotextil-geored, geotextil-geomalla, geotextil-núcleo de poliestireno...).

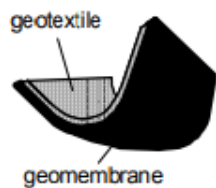


Ilustración 11. Geocompuesto

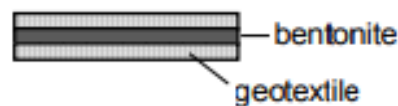


Ilustración 12. GCL

Fuente: (International Geosynthetic Society, Geosynthetic Classification)

Esta creativa combinación de elementos permite muchas de las funciones antes mencionadas. Hay que destacar los GCL (Geosynthetic Clay Liners) como una clasificación única dada la interesante yuxtaposición entre el polímero y el uso de materiales naturales.

- ❖ GEOTUBOS O GEODRENES: son tubos de pared sólida y perforada para el drenaje de líquidos o gases. A menudo están envueltos con filtros geotextiles para evitar su obstrucción.

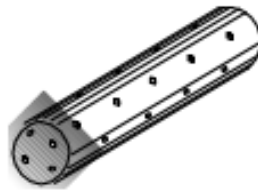


Ilustración 13. Geopipe

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Classification)

- ❖ GEOCELDAS: son estructuras tridimensionales con forma de panales comunicados entre sí. Sus tiras están unidas entre sí formando las celdas que se rellenan con suelo, o en ocasiones hormigón. Tienen una alta resistencia y se utilizan como confinamiento lateral, reforzando el suelo y aumentando su resistencia a tensión.

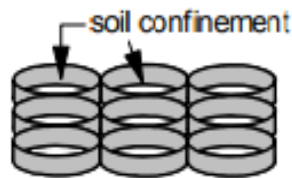


Ilustración 14. Geocelda

Fuente: (International Geosynthetics Society, Geosynthetics Classification)

En ocasiones se han usado geomallas de 0,5 a 1 m de ancho unidas con varillas poliméricas verticales para formar capas de geoceldas profundas llamadas geomatrices.

- ❖ OTROS: geoespuma de baja densidad para aislamiento o relleno ligero para disminuir las presiones del terreno; geomantas para el control de la erosión y del crecimiento de vegetación; etc.

2. APLICACIÓN DE GEOSINTÉTICOS EN FIRMES

2.1. REPASO A LA NORMATIVA DE CONSERVACIÓN DE FIRMES

Es necesario esclarecer la normativa para la rehabilitación de firmes, y de la misma forma para el uso de geosintéticos (en general y en la conservación de firmes). De esa forma se constituye un marco normativo al que ajustarse durante el estudio de las distintas alternativas valoradas durante el presente trabajo.

La norma 6.3 de la Instrucción de Carreteras trata de la rehabilitación de firmes en carreteras e incluye referencias a materiales y técnicas que aún no han sido incluidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación (PG-4).

Se debe consultar de igual manera el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), con la última modificación publicada en el Boletín Oficial del Estado (BOE) del 22 de mayo de 2018. El artículo 290 habla de geotextiles y otros productos relacionados, especificando su comportamiento a los diversos esfuerzos y estableciendo los ensayos correspondientes.

De acuerdo con este artículo, “se define como geotextil (GTX) al material textil plano, permeable y polimérico (sintético o natural), que se emplea en contacto con suelos u otros materiales en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil, pudiendo ser tricotado, tejido o no tejido, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 10318-1. A los efectos de este artículo, se entienden como productos relacionados con los geotextiles (GTP), a aquellos que no se corresponden con la definición anterior, contemplándose la utilización de los siguientes: geomalla (GGR), georred (GNT), geomanta (GMA), geocelda (GCE), geotira (GST) y geoespaciador (GSP), definidos por la norma UNE-EN ISO 10318-1. Se entienden asimismo incluidos en este artículo aquellos geocompuestos (GCO) en los que la totalidad de los materiales que los constituyan se encuentren comprendidos en la relación anterior”. (BOE, 2018)

Esta definición se asemeja a la descripción del IGS y de otras fuentes, ya que la mayoría de acepciones relacionadas con los geosintéticos deriva de la definición inicial de las normas AASHTO. De la misma forma, gran parte de la normativa europea y española se basa en dichas normas americanas. Aunque se pueden encontrar discrepancias entre las denominaciones de dichas fuentes (por ejemplo las denominaciones “geotira” o “geoespaciador” versus la clasificación propia del IGS), una lectura más detenida permite comprobar que son muy similares entre sí, debido a su origen común.

Según el anterior artículo 290, “los geotextiles y productos relacionados deberán tener obligatoriamente el marcado CE, conforme a lo establecido en las normas UNE-EN

13249, UNE-EN 13251, UNE-EN 13252, UNE-EN 13253, UNE-EN 13256 y UNE-EN 15381". (BOE, 2018)

"El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares indicará el tipo y características de los geotextiles y productos relacionados a emplear en las diferentes unidades de obra, dependiendo de cada uso concreto, y de conformidad con lo indicado en los epígrafes 290.2.3, 290.2.4, 290.2.5 y 290.2.6 de este artículo." (BOE, 2018)

Tabla 1. (TABLA 290.1) PROPIEDADES A EXIGIR A GEOTEXTILES Y PRODUCTOS

Propiedad	Norma de ensayo	Funciones		
		Filtración	Separación	Drenaje
RESISTENCIA A TRACCIÓN.	UNE-EN ISO 10319	X	X	X
ALARGAMIENTO A LA CARGA MÁXIMA.	UNE-EN ISO 10319	X	X	X
PUNZONADO ESTÁTICO (ensayo CBR) ⁽¹⁾	UNE-EN ISO 12236		X	
RESISTENCIA A LA PERFORACIÓN DINÁMICA.	UNE-EN ISO 13433	X	X	
FLUENCIA A LA COMPRESIÓN ⁽¹⁾	UNE-EN ISO 256191			X
MEDIDA DE ABERTURA CARACTERÍSTICA.	UNE-EN ISO 12956	X	X	
PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULARMENTE AL PLANO.	UNE-EN ISO 11058	X	X	
CAPACIDAD DEL FLUJO DE AGUA EN EL PLANO.	UNE-EN ISO 12958			X

(1) Puede no resultar aplicable a determinados tipos de geosintéticos

Fuente: TABLA 290.1 (BOE, 2018)

Además de las propiedades exigibles en estos materiales (como se ha visto en la Tabla 1), cabe destacar las propiedades relacionadas con la durabilidad, que son la resistencia a la intemperie y la vida en servicio.

Es decir, existe una normativa para el uso de geosintéticos en carreteras, con las funciones de refuerzo, drenaje, separación y control de la erosión, pero como ocurre en todos los productos novedosos, no se cuenta con una gran experiencia de su comportamiento, tanto en laboratorio como una vez puesto en obra, por lo que no se ve reflejado en la legislación.

Actualmente se consulta directamente la norma AASHTO M-288, una norma americana a partir de la cual se han elaborado guías de instalación y funcionamiento, con ensayos normalizados por la ASTM, que incluye acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales. Esta norma confiere unos valores exigibles para dichos productos que han sido adoptados para los ensayos en las normas UNE.

2.2. APLICACIÓN DE GEOSINTÉTICOS EN FIRMES

Aunque no es objeto principal de este trabajo, conviene realizar un repaso de la clasificación general de los firmes, ya que la normativa contemplada hasta ahora se aplica o no en función del tipo de firme del que se trate. Podemos distinguir de forma sencilla entre firmes flexibles, semiflexibles, semirrígidos y con pavimento de hormigón. Los tres primeros se engloban en la definición de pavimento bituminoso.

- ❖ Los firmes flexibles son aquellos con capas granulares no tratadas y materiales bituminosos $e < 15$ cm (si el espesor es $e \geq 15$ cm entonces se considerará semiflexible).
- ❖ Los firmes semirrígidos se consideran los constituidos por materiales bituminosos en cualquier espesor, sobre una o más capas de conglomerantes hidráulicos (un espesor conjunto de $e \geq 18$ cm) contribuyendo a la resistencia estructural.

El resto de tipos de firme, como los adoquinados, los de mezclas bituminosas sobre hormigón o firmes mixtos, y los firmes sin pavimentar, no se contemplan en la norma 6.3 de la IC (Ministerio de Fomento, 12), y por tanto su rehabilitación se debe efectuar mediante un estudio adecuado y soluciones específicas. Es el caso de nuestro aparcamiento.

La elección de geosintéticos en firmes depende de las funciones que deban desempeñar en cada caso y del motivo de su aplicación. Anteriormente se ha hablado de forma general de estas funciones y tipos.

Si se pone el foco en el uso de geosintéticos en firmes, se puede hablar de filtración, separación, refuerzo, drenaje, protección, y relajación de tensiones. En el caso de la prevención del reflejo de grietas, se recurre a la misma normativa ya que hasta el momento no existe una normativa específica para la misma, aunque durante el año 2019 la Asociación Técnica de Carreteras publicará una guía no normativa de uso de geosintéticos en rehabilitación de firmes de carreteras, muy centrada en esta problemática del reflejo de fisuras (GT-5).

Lo normal es que los geosintéticos cumplan más de una de estas funciones, de forma simultánea. Así, se elige el geosintético a usar en función de la combinación más apropiada de sus características y funciones.

En la siguiente tabla se puede encontrar las funciones tecnológicas de cada tipo de geosintético de forma general.

Tabla 2. Funciones según el tipo de geosintético

TIPO DE GEOSINTÉTICO	FUNCIONES
Geotextiles	<p>Impedir contaminación entre capas de la estructura por el efecto de las cargas dinámicas y el arrastre del agua.</p> <p>Resistir los esfuerzos de tensión del material disminuyendo los espesores de diseño y los volúmenes de movimiento de tierras.</p> <p>Evitar el taponamiento por colmatación de estructuras de drenaje.</p> <p>Evitar la aparición de grietas por reflexión en la capa de rodadura al actuar como una interfase de separación entre la capa de rodadura nueva y la capa antigua fisurada.</p>
Geomallas	<p>Reducir el espesor de las capas estructurales del firme o mejorar las especificaciones de las mismas.</p> <p>Reducir la formación de roderas por esfuerzo cortante y asentamientos diferenciales en el firme en general y las capas de pavimentación en particular.</p> <p>Conferir mayor durabilidad a la estructura de firme.</p> <p>Mejorar la capacidad portante, resistencia a movimientos y deformaciones laterales de la estructura de firme.</p> <p>Evitar la aparición de grietas por reflexión al absorber esfuerzos cortantes y tensiones causadas por efecto de las cargas actuantes sobre el área de influencia de las fisuras del pavimento anterior.</p>
Geocélulas / Geosteras	<p>Facilitar métodos constructivos por medio de sus facilidades de instalación y su versatilidad.</p> <p>Reducir empuje sobre estructuras de contención: a) amortiguando cargas y b) reduciendo la densidad del relleno.</p> <p>Absorber deformaciones por efecto de las cargas estáticas y dinámicas en la estructura de pavimento.</p>
Geodrenes	<p>Captar y conducir agua intersticial de la estructura dirigiéndola hacia los elementos de conducción superficiales.</p> <p>Captar fluidos en profundidad.</p>

Fuente: *Geosintéticos en carreteras: Planteamientos para su aplicación en las capas de* (Herrador, Baamonde Roca, & Pérez Pérez) Universidad da Coruña.

La función de refuerzo se asocia principalmente a las capas base del firme, mientras que la de impermeabilización puede resultar más interesante en las intermedias, bajo la rodadura. No obstante se podría pensar en utilizar un material que pueda combinar ambas funciones, determinando su ubicación más adecuada para cada caso. Es decir, existe una gran variedad de combinaciones y ubicaciones para lograr el objetivo que se desea.

Esto implica que la utilización de geosintéticos en la rehabilitación de firmes puede o no implicar la retirada del firme de las capas superiores. En primer lugar cabe distinguir los tipos de actuaciones en la rehabilitación de firmes para poder conocer la necesidad del uso de geosintéticos en cada caso.

Según la normativa 6.3 de la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Fomento, 12), las actuaciones de rehabilitación de firmes y pavimentos se clasifican según su finalidad en estructurales y superficiales. Las actuaciones de rehabilitación estructural son necesarias para aumentar de forma significativa la capacidad estructural del firme, mientras que las de rehabilitación superficial son de simple conservación o mejora, así como de protección.

Con la rehabilitación estructural claramente se solucionan los problemas a nivel superficial ya que, si se realiza de forma adecuada, se mejoran todas sus características funcionales y su textura superficial.

2.3. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE GEOSINTÉTICOS EN CAPAS DE FIRME

A la hora de decidir las características y la disposición del geosintético según su utilidad, es de uso extendido el manual *Designing with geosynthetics* (M. Koerner, 2012). En este libro se pueden encontrar las metodologías a seguir para cada tipo de geosintético, en función de la aplicación que se le quiera dar. Existen métodos analíticos para geotextiles para refuerzo de carreteras o de taludes, drenaje... y de la misma forma para otros tipos de geosintéticos.

Dado que el objetivo de este trabajo con respecto a los geosintéticos es el de estudiar su utilidad en el refuerzo de las plazas de aparcamiento, y teniendo en cuenta que este aparcamiento consta de firmes permeables, las dos funciones principales que deberá tener el/los geosintético/s seleccionados serán las de refuerzo y drenaje.

De esta forma, se puede hacer una preselección de los geosintéticos, descartando directamente aquellos geosintéticos del capítulo Tipología de geosintéticos que no cumplan las funciones de refuerzo y drenaje, sin necesidad de entrar en más detalle sobre el caso práctico. Se pueden descartar de forma directa tanto los geosintéticos no tejidos, que no poseen las cualidades necesarias para servir de refuerzo, como las geomembranas, que pueden utilizarse como refuerzo en ciertos casos pero cuya función impermeabilizante es contraproducente para esta aplicación.

2.3.1. Metodología de diseño para geotextil tejido o geomalla

Las alternativas que sí se barajan son las de los geotextiles tejidos y las geomallas, dado que el espaciado entre sus fibras permite la filtración de agua, y sus características les permiten mayores capacidades de carga que los no tejidos.

En caso de utilizarse este tipo de geosintéticos, se colocan al nivel de los actuales, entre la sub-base y la base, pero habrán de anclarse para asegurar la tensión que garantiza una buena oposición frente al peso del vehículo y las capas intermedias.

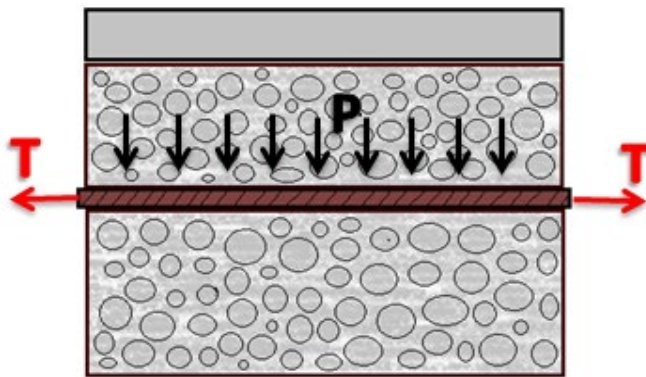


Ilustración 15. Disposición del geosintético entre base y sub-base.
Fuente: elaboración propia.

La tensión de los extremos, gracias a un correcto anclaje y una gran resistencia a tracción, junto con la baja deformación que debe tener el geosintético elegido serán lo que evite el hundimiento o asiento diferencial.

Se puede tener en cuenta que la resistencia a tracción de este tipo de geosintéticos en fábrica y la de recepción en obra serán distintos debido a tres factores principales de reducción: por durabilidad, instalación y fluencia. La fluencia del material escogido, entendida como la deformación creciente a lo largo del tiempo manteniendo una tensión constante, deberá ser muy reducida para evitar el hundimiento. Según *Designing with Geosynthetics* (M. Koerner, 2012), estos factores de reducción en los geotextiles varían de la forma:

Tabla 3. Factores de reducción de geotextiles

AREA	INSTALLATION DAMAGE (DAÑO EN INSTALACIÓN)	CREEP (FLUENCIA)	CHEMICAL/BIOLOGICAL DEGRADATION (DURABILIDAD)
Pavement overlays	1.1 to 1.5	1.0 to 2.0	1.0 to 1.5

Fuente: *Designing with Geosynthetics* (M. Koerner, 2012)

Sin contar aún con los factores proporcionados por las marcas, lo habitual es optar por un factor medio (1.3 para el daño por instalación y 1.25 para la durabilidad) excepto para la fluencia, en la que consideraremos el mayor factor existente (2.0) debido a la necesidad de que el geotextil se mantenga sin deformación a lo largo del tiempo.

Para el caso de las geomallas, los factores de reducción se oscilan entre los siguientes valores:

Tabla 4. Factores de reducción de geomallas

AREA	INSTALLATION DAMAGE (DAÑO EN INSTALACIÓN)	CREEP (FLUENCIA)	CHEMICAL/BIOLOGICAL DEGRADATION (DURABILIDAD)
Paved roads	1.2 to 1.5	1.5 to 2.5	1.1 to 1.7

Fuente: *Designing with Geosynthetics* (M. Koerner, 2012)

Al igual que antes, optamos por un factor medio (1.35 para el daño por instalación y 1.4 para la durabilidad) excepto para la fluencia, en la que se considera el mayor factor existente (2.5).

Los factores de reducción reducirán la tensión última, dando lugar a la tensión realmente admisible por el geosintético.

$$T_{adm} = T_{ult} \times \left(\frac{1}{FR_{inst} + FR_{fluen} + FR_{durab}} \right)$$

Para poder determinar la tensión a la que está sometido el geotextil, o la geomalla, no existe un método analítico directamente aplicable para el refuerzo de aparcamientos.

Sí se puede encontrar un método usado para el refuerzo en calzadas, asemejando las ruedas del automóvil a unas cimentaciones de ancho B (el ancho de las ruedas) y longitud L, que se distribuye por las capas intermedias hasta el geotextil en forma piramidal.

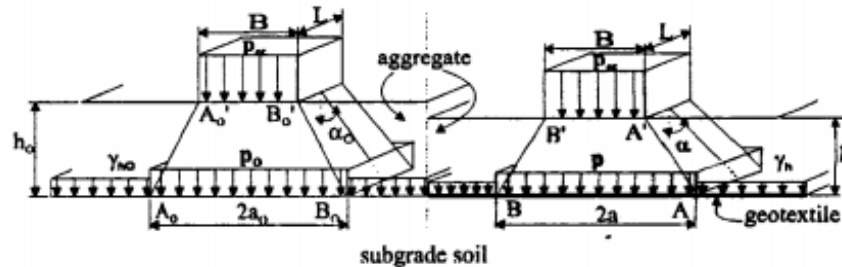


Ilustración 16. Distribución piramidal de cargas.

Fuente: (Giroud & Noiray, 1981)

El método consta de tres ecuaciones en función de diversas variables como la presión de la rueda, la altura de la capa intermedia y su cohesión, las características del geotextil... y se pueden combinar en una ecuación final de la forma:

$$(\pi + 2)c = \frac{P}{2 \times (B + 2h \tan \alpha) \times (L + 2h \tan \alpha)} + \frac{E \times \varepsilon}{a \sqrt{1 + (a/2S)^2}}$$

(Giroud & Noiray, 1981)

Siendo:

- c cohesión
- P carga axial
- B ancho de rueda
- L largo de estudio
- h profundidad del geotextil
- α ángulo de distribución
- E módulo del geotextil
- ε elongación
- a propiedad geométrica (ver ilustración 16)
- S asiento

Parece lógico, por tanto, que si se dispone del resto de valores de forma aproximada se podría obtener la tensión como producto del módulo por la elongación ($T = E \times \varepsilon$). No obstante, al realizar los cálculos la ecuación no da un valor coherente de la tensión para el presente caso de estudio, posiblemente porque este método está pensado para materiales de agregado con cohesión, mientras que nuestra base no la tiene. Cabe destacar también que la dimensión L para el caso de estudio de Giroud y Noiray es el largo de la calzada, mientras que en un aparcamiento esa dimensión apenas es apreciable (las ruedas se mantienen apoyadas en el mismo punto).

Ante la imposibilidad de usar este u otro método para obtener las características necesarias de nuestro geotextil o geomalla (tensión, módulo y deformación) para su uso en un aparcamiento, se debe realizar un estudio propio.

Este análisis dependerá de la forma de distribución de cargas que se considere, puesto que el peso correspondiente al vehículo estacionado podrá repartirse de forma homogénea hasta el geotextil o geomalla:

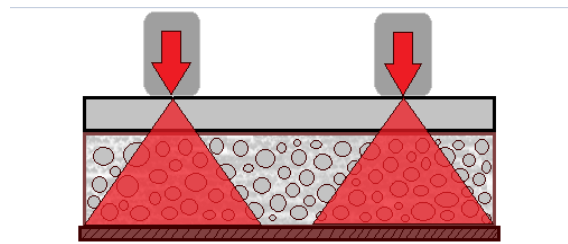


Ilustración 17. Distribución piramidal de cargas desde contacto puntual con el neumático. Fuente: elaboración propia

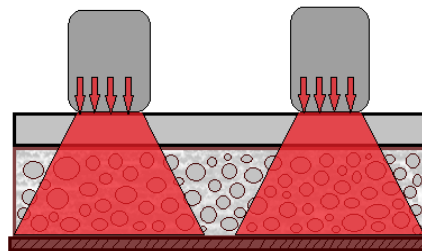


Ilustración 18. Distribución piramidal de cargas desde el ancho del neumático. Fuente: elaboración propia

Pero esta suposición se basa en que la base desde el firme hasta el geotextil tenga cierta cohesión, lo que no sucede. Por tanto sería mejor considerar que el peso del vehículo llega de forma aproximadamente puntual al geosintético, con lo que la deformación se produciría de la forma:

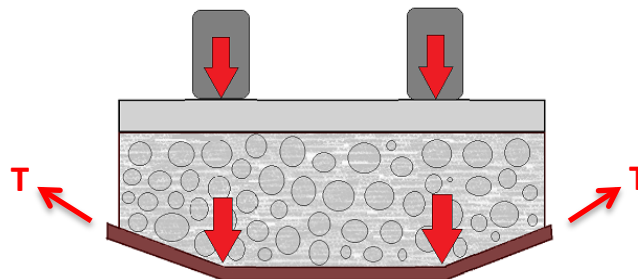
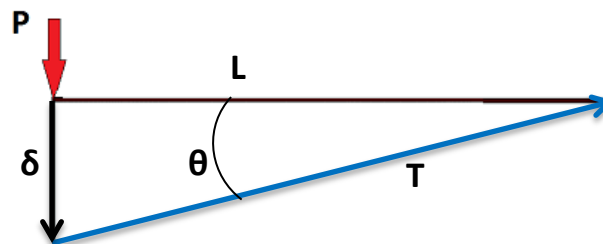


Ilustración 19. Deformación del geosintético bajo carga puntual. Fuente: elaboración propia

En ese caso, la tensión por metro de longitud (normalmente se dan valores en kN por metro de geosintético) que soporta el geotextil o la geomalla es fácil de calcular en función de la carga puntual, la equivalente al peso del vehículo entre cuatro (carga por neumático). En este cálculo se despreciaría el peso del firme y de la base al no considerar un cono para distribución de cargas.



La longitud L será la distancia entre el neumático y el extremo de la plaza de aparcamiento; P será el peso correspondiente a uno de los neumáticos (el peso del vehículo entre cuatro, considerando que es el mismo para el eje delantero y para el trasero), y δ será el asiento diferencial que se puede considerar aceptable.

$$\tan \theta = \frac{\text{asiento } \delta}{\text{distancia a neumático } L}$$

$$T \times \sin \theta = P$$

El cálculo, por supuesto, variará en función de las dimensiones de las plazas y del asiento diferencial que se vaya a considerar admisible. Además cabe recordar que la tensión resultante deberá ser mayorada con los factores de daño por instalación, durabilidad y fluencia, por lo que la tracción que el geosintético debe ser capaz de soportar es aún mayor.

Los cálculos detallados se desarrollan en el capítulo del [Caso Práctico](#), pero a simple vista es fácil deducir que la tracción a soportar por el geosintético deberá ser muy elevada si se quiere conseguir un asiento diferencial reducido (T aumenta para un mismo P si el ángulo θ es muy pequeño).

2.3.2. Metodología de diseño para geoceldas

Existe otra alternativa para el refuerzo de plazas de aparcamiento con firmes permeables mediante geosintéticos, y es el uso de geoceldas reforzadas. Este tipo de refuerzo conlleva un estudio aparte, puesto que la colocación y funcionamiento de este geosintético como refuerzo presenta diferencias importantes.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que las geoceldas son aptas para el refuerzo gracias al confinamiento del relleno interno de sus celdas, con la consiguiente fricción. Es decir, parte de la base irá confinada dentro de la propia geocelda por lo que la disposición de las capas respecto al geosintético es distinta a la Ilustración 15, estando la geocelda reforzada directamente debajo del firme:

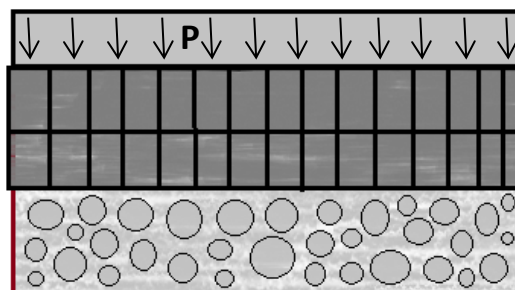


Ilustración 20. Disposición de la geocelda. Fuente: propia

El funcionamiento de este refuerzo no se basa en la resistencia a tracción del geosintético y por tanto no debe ir anclado en sus extremos. Las geoceldas reforzadas basan su capacidad de refuerzo en carretera en la compresión que pueden soportar en dirección perpendicular a su plano de colocación, por lo que el cálculo para su diseño es significativamente más sencillo, coincidiendo dicha compresión con el peso por encima de la geocelda.

Dado que la resistencia a la compresión de este tipo de celdas según las marcas comerciales se suele dar en toneladas por metro cuadrado de superficie, no será necesario más que dividir el peso total del vehículo (el peso del firme se puede considerar despreciable) entre la superficie de la plaza, suponiendo una distribución homogénea de la carga por toda la superficie.

No obstante, no suele ser el caso, especialmente en firmes permeables flexibles o incluso discontinuos, como es el caso de los adoquines que simplemente reposan sobre una base, sin apenas contacto entre ellos. En este supuesto, la carga se ve prácticamente transmitida en el mismo punto a la base, o en este caso a la geocelda reforzada, estando más concentrada.

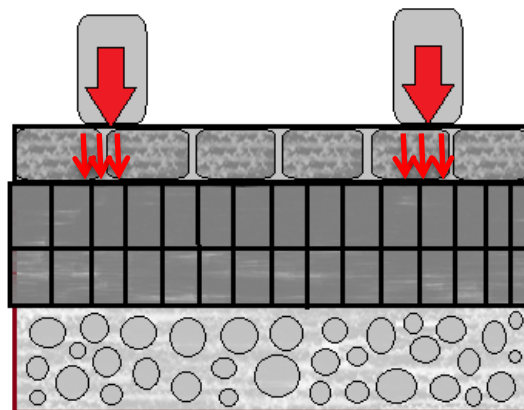


Ilustración 11. Carga concentrada en el neumático sobre la geocelda en firme adoquinado. Fuente: propia

Sin embargo, esto no influye en gran medida al cálculo en las plazas de aparcamiento, debido a su pequeña superficie; y de manera especial, hablando de geoceldas, que cuentan con valores de resistencia a la compresión por lo general muy elevados, superiores a las necesidades de estacionamiento de un vehículo ligero.

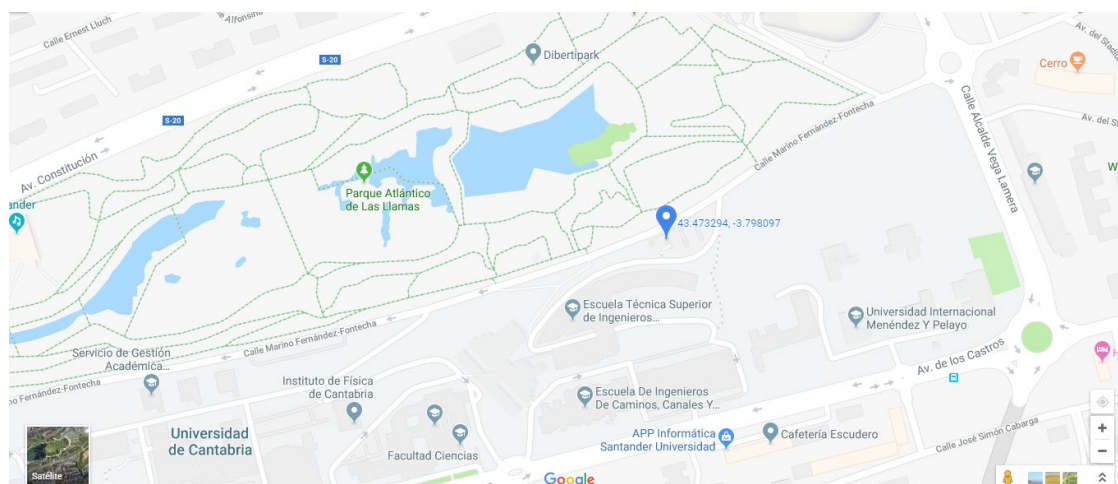
3. APLICACIÓN AL CASO PRÁCTICO

3.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO PRÁCTICO

En esta segunda parte del trabajo, se va a proceder a entrar en detalle sobre el caso práctico, con el análisis de su estado actual y los fallos encontrados, y con la propuesta de distintas soluciones. Para ello se van a aplicar los conocimientos sobre geosintéticos anteriormente repasados, pero sin limitarse al uso de este tipo de materiales. Es decir, se van a valorar todas las alternativas viables, desde la alternativa cero de no actuación, pasando por el uso de geosintéticos de refuerzo, hasta aquellas soluciones tradicionales o modernas que se ajusten al caso.

3.1.1. UBICACIÓN DEL CASO PRÁCTICO

El área en el que se desarrolla el caso práctico de este trabajo de fin de grado es el aparcamiento experimental de la Universidad de Cantabria, situado en la Vaguada de las Llamas, al norte de la ciudad de Santander. El parque está delimitado por dos grandes vías, la S-20 y la avenida de los Castros, y consta de varios aparcamientos, de los que el de menor dimensión es el aparcamiento monitorizado objetivo de este trabajo.



La vaguada se encontraba, hasta principios del siglo XX, ocupada por una de las dos rías principales de Santander, y representa por tanto uno de los pocos humedales con los que cuenta el municipio.

Debido a la creación del campo de fútbol y de la segunda playa del Sardinero, el desagüe natural de la ría se interrumpió, y en los años posteriores el desarrollo urbano y la construcción de nuevas edificaciones aislaron en mayor medida la vaguada.

Este hecho, unido a la utilización de los terrenos como vertedero de residuos procedentes de la construcción, contribuyó a la pérdida de gran parte del humedal.

Este tipo de ecosistemas, a pesar de la escasa valoración que recibieron en el pasado, constituyen un híbrido entre ecosistemas acuáticos y terrestres con una importancia ecológica crucial debido a su gran biodiversidad. La realización de rellenos y vertidos de aguas residuales en la vaguada provocaron la degradación de la calidad de las aguas del lugar y destruyeron de forma casi irreparable el ecosistema y sus características paisajísticas.

Con la construcción del Parque Atlántico de las Llamas o Parque de la Vaguada de las Llamas, en el año 2006, el Ayuntamiento de Santander comenzó el proceso de recuperación de la zona. A pesar de las dificultades que ha representado la construcción, en la actualidad la puesta en valor ha logrado recuperar una parte importante de la biodiversidad, convirtiendo el humedal en zona de paso de numerosas especies migratorias.

En cualquier caso cabe destacar los problemas que se han desarrollado a lo largo de la obra: el gran coste de algunos de los materiales y componentes, como las jardineras; la incorrecta implantación de las especies arbóreas, y diversos defectos en el drenaje, los estacionamientos y las carreteras de acceso.

El aparcamiento objeto del caso de estudio forma parte de este parque y se llevó a cabo tras el edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIT), como se puede observar en la imagen satélite a continuación.

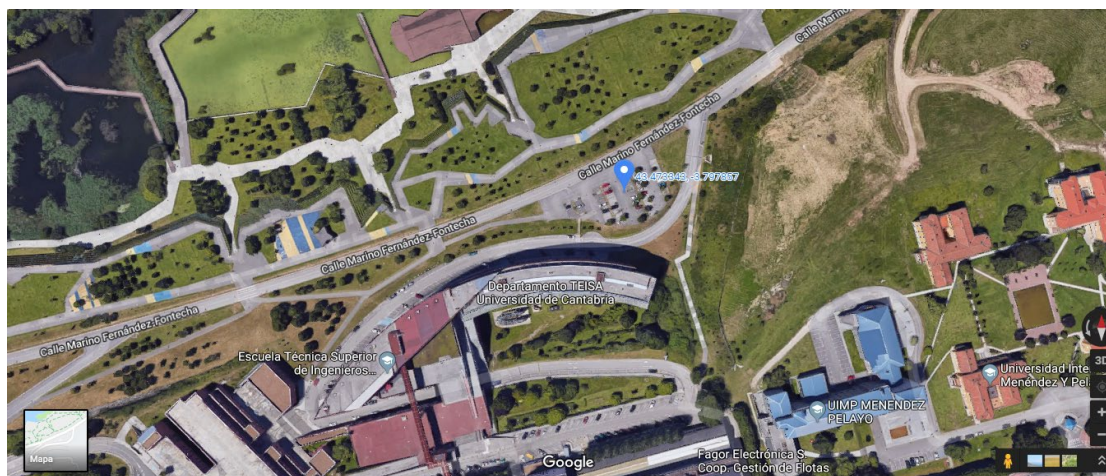


Ilustración 23. Imagen satélite del aparcamiento tras la ETSIIT. Fuente: (Google Maps, 2019)

Consta de 45 plazas de aparcamiento monitorizadas, extendidas sobre la horizontal sin pendientes longitudinales o transversales. 43 de ellas son de medidas convencionales (4,2 x 2,4 m), y dos de personas con discapacidad (4,2 x 4,8 m).

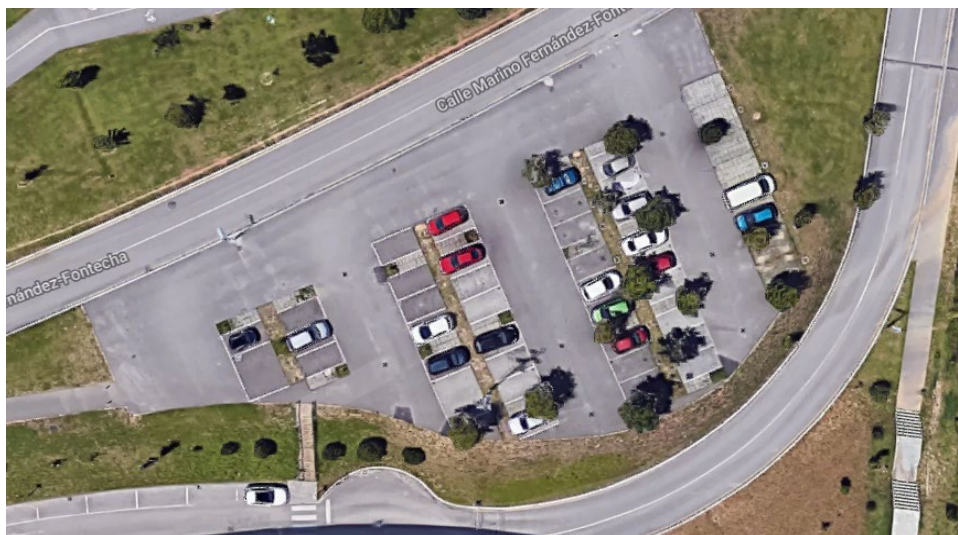
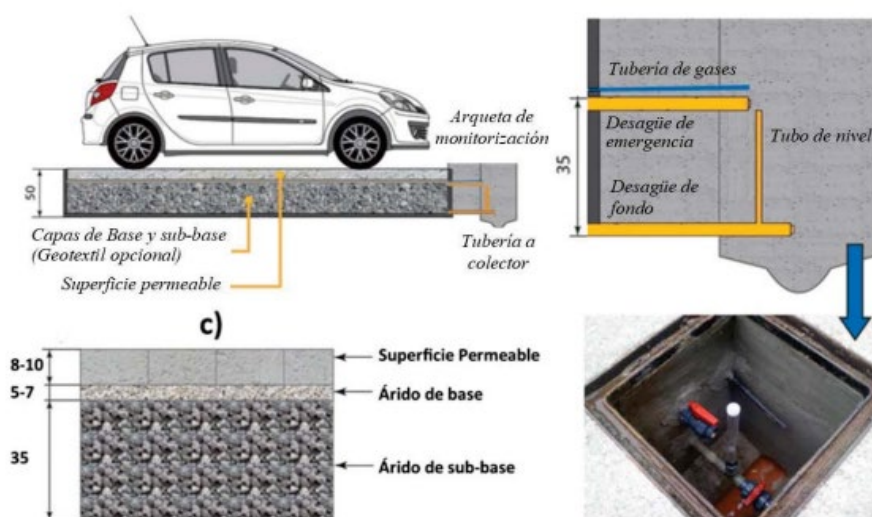


Ilustración 12. Imagen satélite del aparcamiento experimental de Las Llamas. Fuente: (Google Maps, 2019)

El objetivo de su construcción era comprobar la viabilidad y eficacia de distintos tipos de firmes permeables, para lo que se construyó cada plaza a modo de piscina estanca, de 50 cm de profundidad, con una solera de hormigón y bloques prefabricados formando un murete perimetral. El murete alcanza los primeros 35 cm, y queda rematado por una pletina metálica hasta la totalidad de la altura. Todo ello forma una piscina totalmente estanca con una impermeabilización a base de tela asfáltica.

Como se puede apreciar en la imagen transversal de la plaza, tras comprobar la estanqueidad de cada plaza se procedió a rellenar con una sub-base y una base de áridos, y el correspondiente geotextil y tipo de firme permeable. Cada plaza tiene dos tubos de PVC de 32 mm de diámetro, uno de fondo y otro de superficie, que hacen las veces de desagüe, y otra tubería perforada al nivel del geotextil con el objetivo de monitorizar los gases que pudieran producirse.



Dimensiones en cm

Ilustración 13. Esquema transversal de plaza tipo. Fuente: *Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana* (Valeri, 2017)

La monitorización de cada plaza se realiza mediante una arqueta propia adyacente que conecta con el colector general, de dimensiones 0,4 x 0,4 m en planta y 0,7 m de profundidad.



Ilustración 14. Aparcamiento experimental en el año 2019. Fuente: propia

La constitución total de las plazas se divide en 6 tipos de firmes permeables y 5 disposiciones diferentes de geotextiles, dando lugar a 17 secciones distintas, aunque a grandes rasgos se puede hacer una clasificación de 6 tipologías distintas:

- Tipo A: Adoquines tipo Hanson-Formpave, geotextil Inbitex (plazas 2 a 5), One-Way (plazas 6 a 9), y la plaza 1 sin geotextil.
- Tipo B: Adoquines Montserrat y geotextil Polyfelt TS30 (plazas 12 a 15), Danofelt PY150 (plazas 16 a 19) y sin geotextil la plaza 11.
- Tipo C: Asfalto poroso, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 20 a 23), Danofelt PY150 (plazas 24 a 27) y sin geotextil la plaza 28.
- Tipo D: Hormigón poroso, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 29 a 32), Danofelt PY150 (plazas 33 a 36), y sin geotextil la plaza 37.
- Tipo E: césped reforzado con celdas de hormigón, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 38 a 39), Danofelt PY150 (plazas 40 a 41) y sin geotextil las plazas 42 y 43.
- Tipo F: césped reforzado con celdas de plástico, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 44 y 45).

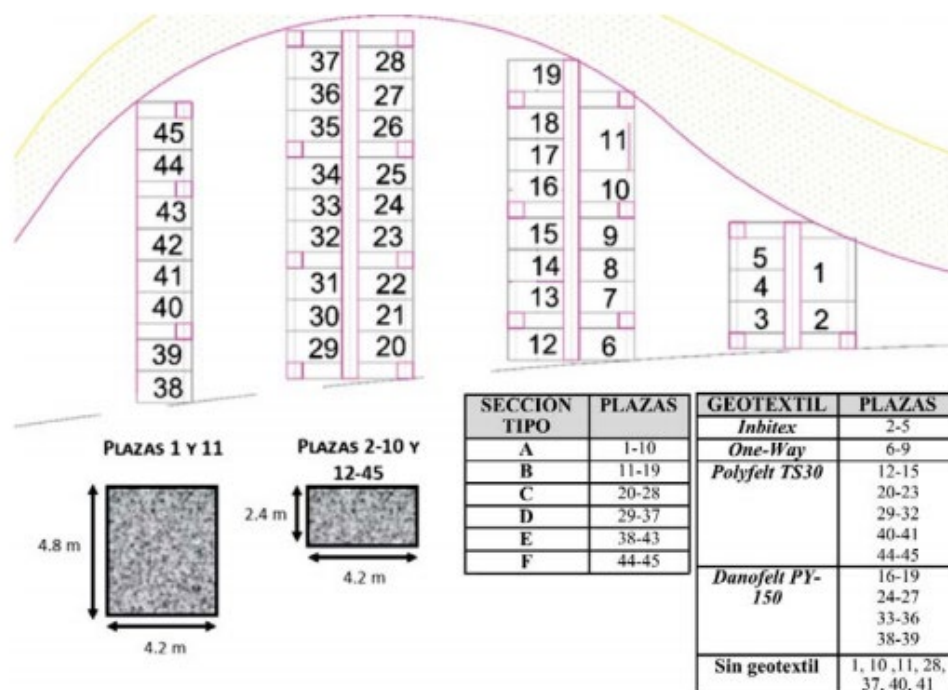


Ilustración 27. Disposición de plazas. Fuente: Tesis Valerio Carlos A. Andrés-Valeri

Tabla 5. Secciones tipo

SECCIÓN TIPO	CAPAS	ESPESOR	MATERIALES
A	Superficie Base Sub-base	8 cm 7 cm 35(10+25)cm	Adoquines Hanson Formpave® Árido calizo (2-6 mm) Árido calizo: (4-20 mm) y (10-63 mm)
B	Superficie Base Sub-base	10 cm 5 cm 35 cm	Adoquines para pavimentos Montserrat® Árido calizo (4-8 mm) Zahorra drenante (ZAD 20)
C	Superficie Base Sub-base	8 cm 7 cm 35 cm	Mezcla bituminosa drenante tipo PA 12 Árido calizo (4-8 mm) Zahorra drenante (ZAD 20)
D	Superficie Base Sub-base	8 cm 7 cm 35 cm	Hormigón poroso modificado con polímeros Árido calizo (4-8 mm) Zahorra drenante (ZAD 20)
E	Superficie Base Sub-base	9 cm 6 cm 35 cm	Césped reforzado con celdas de hormigón Árido calizo (4-8 mm) Zahorra drenante (ZAD 20)
F	Superficie Base Sub-base	5 cm 10 cm 35 cm	Césped reforzado con celdas de plástico Árido calizo (4-8 mm) Zahorra drenante (ZAD 20)

Fuente: (Valeri, 2017)

Cabe destacar que en todas las plazas el drenaje ha resultado satisfactorio, pero han surgido problemas de carácter estético y funcional en la superficie de las plazas. Estos problemas van desde las roderas hasta la rotura de adoquines, defectos de junta en las pletinas, manchas en el pavimento... No obstante, dado que algunos de los problemas ahora mencionados ya han sido tratados en otros trabajos, el objetivo actual es el de reforzar las plazas para solucionar los asientos diferenciales de las plazas respecto a la pletina perimetral rígida. Por tanto se va a dar un pequeño repaso a la clasificación y el estado de las plazas, para elegir cuáles de ellas requieren refuerzo y cómo se va a plantear el mismo.

3.1.2. DESCRIPCIÓN DE FIRME Y CONDICIONES

La condición actual del firme incluye diversos fallos que ya se detallaron en *“Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de Las Llamas, Santander”* (García Perales, 2014), por lo que no entran en el ámbito de estudio de este trabajo. Sí es competencia del presente trabajo y caso práctico el hundimiento de las plazas, que es fácilmente visible mediante la observación del asiento diferencial del centro de las plazas respecto de la pletina perimetral que rodea cada plaza, que marca el nivel original de las plazas en el momento de su construcción.

Los geosintéticos instalados inicialmente en las plazas no eran de refuerzo, ni estaban anclados en los extremos, por lo que no han contribuido a la resistencia de las plazas. Para comprobarlo no hace falta más que medir los asientos diferenciales de los distintos tipos de plazas, pudiendo observar que algunas de ellas han sufrido un mayor hundimiento respecto al nivel de la pletina rígida del perímetro.

3.1.2.1. Mezcla bituminosa drenante (C) y hormigón poroso (D).

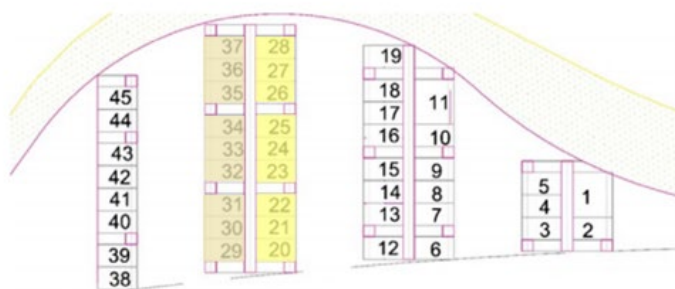


Ilustración 28. Plazas tipo (C) 20-28 y tipo (D) 29-37. Fuente propia

Las plazas con firme de mezcla bituminosa drenante tipo PA 12 y de hormigón poroso modificado con polímeros son las que menor asiento presentan. Debido a su rigidez, las cargas se han transmitido de forma distribuida, y el hundimiento respecto a la pletina que forma el perímetro externo apenas es apreciable, si bien presentan cierto desgaste superficial y manchas debidas a las pruebas con aceite que se realizaron con anterioridad en las plazas. Aquí se puede observar el estado actual de dichas plazas:



Ilustración 29. Plaza de mezcla bituminosa drenante. Fuente propia



Ilustración 30. Plaza de hormigón poroso. Fuente: propia

No obstante se desconoce el estado del material bajo dichas placas, dado que puede que el material de la base y sub-base haya sido machacado por las cargas y que exista un hueco bajo la placa. En ese caso, aún no ha afectado al apoyo del firme pero existe la posibilidad de que se creen grietas o hundimiento en un futuro.

3.1.2.2. Césped reforzado mediante celdas de plástico (F)

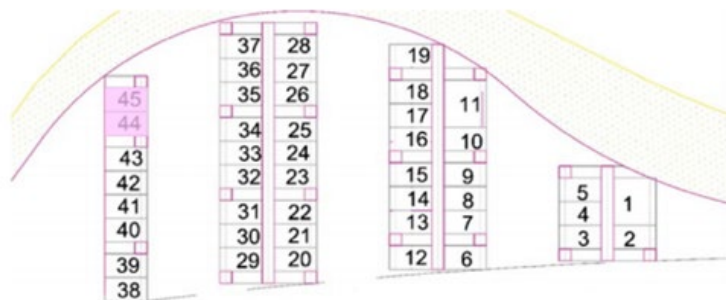


Ilustración 31. Plazas tipo (F) 44-45. Fuente propia

En el césped reforzado mediante celdas de plástico, el mayor problema es el desgaste superficial de dichas celdas debido al paso de los vehículos, especialmente destacable en los extremos, partiendo de las irregularidades que generan recortes de las piezas en el montaje. Por esa razón se sustituyó la celda inicial por otra y se cambió el césped por grava.



Ilustración 32. Desperfectos de las celdas reforzadas con grava. Fuente propia.

En estas plazas se ha podido medir un asiento respecto a la horizontal de 10 mm en el eje delantero y de 13 mm en el eje trasero del vehículo (lógico dado que es el eje que carga con mayor peso), respecto de un hundimiento de tan solo 6 mm en el centro. Esto nos lleva a pensar que en estas plazas la distribución de cargas no se transmite de forma perfectamente distribuida, sino que se concentra al nivel de los ejes del vehículo estacionado.



Ilustración 33. Plaza de grava reforzada con celdas. Asientos diferenciales respecto a la pletina. Fuente propia

3.1.2.3. Césped reforzado con celdas de hormigón (E)

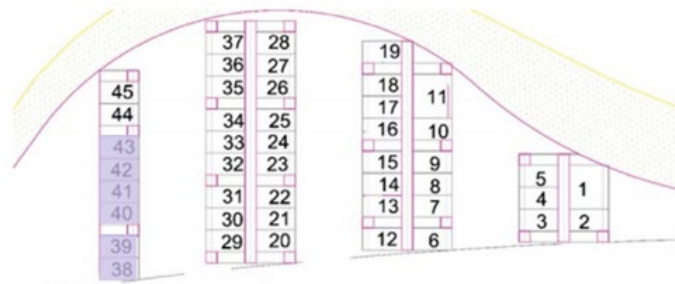


Ilustración 34. Plazas tipo (E) 38-43. Fuente propia

El césped reforzado con celdas de hormigón presenta un asiento diferencial respecto al nivel de la pletina similar al anterior, situado en el punto de apoyo de los neumáticos del vehículo, y va de los 8 a los 11 mm respecto de la horizontal, siendo de tan solo 4 mm en el centro.

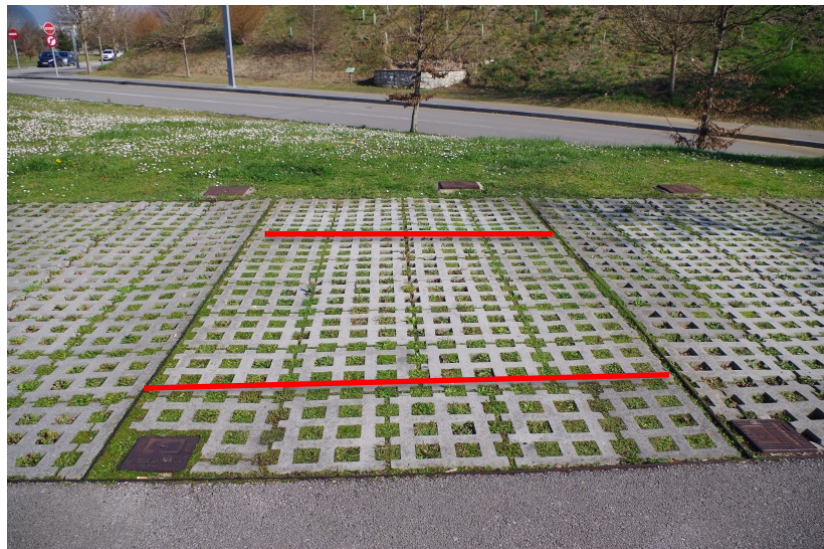


Ilustración 35. Césped reforzado por celdas de hormigón. Fuente propia

Cabe destacar que en este tipo de plazas la distribución parece estar también concentrada en los ejes de las ruedas, pero con el inconveniente añadido de que el punto de apoyo del neumático coincide con las juntas entre celdas, lo que ha podido contribuir al movimiento de estas celdas.



Ilustración 36. Movimiento de las celdas de hormigón. Fuente propia

De esta forma, el hundimiento de las celdas en estos puntos y el consiguiente levantamiento en el extremo opuesto, repetidos de forma cíclica a lo largo de los sucesivos estacionamientos, ha aumentado el desgaste de la base bajo las celdas acelerando por tanto el hundimiento.

3.1.2.4. Adoquines Hanson-Formpave (A) y Montserrat (B)

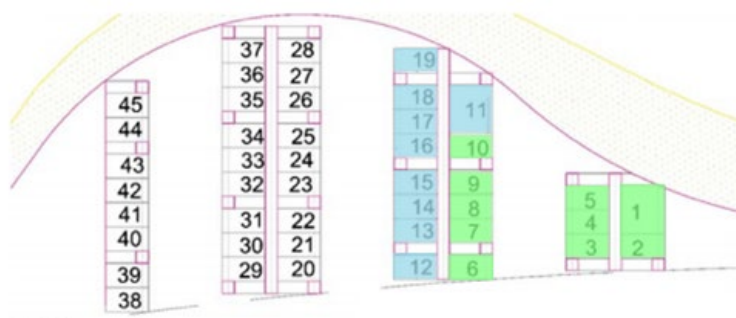


Ilustración 37. Plazas tipo (A) 1-10 y (B) 11-19. Fuente propia

Las plazas de adoquines, tanto los Hanson Formpave como los Montserrat, son las que más hundimiento presentan respecto a la horizontal. Es fácilmente apreciable en el perímetro exterior, dado que en la cercanía a la pletina los adoquines se mantienen a la altura inicial debido a la rigidez del murete perimetral sobre el que está colocado.



Ilustración 38. Perímetro de las plazas adoquinadas. Fuente propia

Las medidas respecto a la horizontal confirman esta apreciación, siendo el hundimiento de 30-38 mm en los bordes de las ruedas, y algo menores en el centro (23 mm).



Ilustración 39. Medida del hundimiento de las plazas de adoquines. Fuente propia

Estos asientos, mayores que los del resto de plazas, podría deberse al carácter discontinuo del firme, que transmite las cargas de manera puntual en vez de transmitirse de forma distribuida. Al estar formado por elementos pequeños que no están interconectados, éstos trabajan de forma individual, por lo que la carga puntual de cada neumático del vehículo se ve transmitida casi directamente a la base por los adoquines inmediatamente bajo dicho neumático. Esto simplifica la forma de cálculo del refuerzo a plantear para los pavimentos de adoquines.

3.1.3. ANÁLISIS DE FALLOS

Habiendo analizado el estado actual del aparcamiento y los distintos fallos, este trabajo se va a centrar, como ya se ha explicado, en el refuerzo para solventar los asientos diferenciales de las plazas.

Dado que las plazas que mayores problemas presentan a este respecto son las adoquinadas, el estudio de alternativas se focaliza en este tipo de plazas. No obstante, al final del estudio se verá la extrapolación que puede realizarse de esta solución al resto de firmes, y las alternativas más adecuadas para cada uno.

El hundimiento en las plazas de adoquines es, por tanto, casi puntual centrado a nivel de los neumáticos del vehículo, llegando los asientos diferenciales hasta los 38 mm. Dados los ensayos de carga en placa que se realizaron en 2015, se consideraría que un asiento admisible debe ser de 1-2 mm máximo, y esa será la finalidad del refuerzo.

El objetivo es que el refuerzo sea capaz de soportar las cargas del vehículo, sin afectar a la capacidad de drenaje del firme permeable. La carga a soportar es la del vehículo más la de las capas por encima del geosintético (superficie y base) que dependerán de la forma de transmisión de las cargas y de la ubicación del geosintético. Teniendo en cuenta que el vehículo tipo para este aparcamiento es un vehículo ligero, y según el Ministerio de Fomento, su peso máximo autorizado es de 6 toneladas (Fomento). Sin embargo, si es posible se estudiará la posibilidad de sustentar tráfico pesado.

Centrándonos en las plazas adoquinadas, el peso correspondiente al firme es únicamente el de los adoquines directamente en contacto con los neumáticos debido a la transmisión puntual de la carga por el carácter discontinuo del firme. Las dimensiones de estos adoquines son de 10x20 cm, con 10 (u 8 cm) de espesor, y con un peso específico de 2300 kg/m³ por lo que el peso correspondiente a la pequeña superficie que transmite la carga es prácticamente despreciable respecto al peso propio del vehículo (4,6 kg por adoquín frente a las 6 toneladas del vehículo).

3.2. ESTUDIO DE REFUERZO

Hay escasos antecedentes en el refuerzo de este tipo de firmes permeables debido a su uso poco extendido, y a la falta de antigüedad de las obras existentes. Sin embargo sí es posible encontrar algunos casos en el medio oeste de Estados Unidos, donde los estacionamientos de adoquines permeables se han vuelto más comunes en los últimos 15 años.

El pueblo de Downers Grove usó con éxito adoquines permeables en la reconstrucción de su centro histórico, completada en 2012. De esta forma se mantuvo la estética de la calle y se mejoró la calidad del agua. Según Storm Water Solutions, *“los adoquines están actualmente en buen estado. Ha habido algunos asentamientos menores en torno a las estructuras de servicios públicos, para los cuales la aldea está considerando la adición de collares de hormigón, pero el único mantenimiento necesario hasta la fecha ha sido la reposición del agregado de relleno de juntas en forma anual”* (Sikich, 2017). Sin embargo, el adoquinado se extendió a Carpenter Street, con cinco veces más tráfico, y el pavimento sí mostró signos de fallo en sus dos primeros años, como asientos diferenciales más pronunciados.

En un estudio publicado por la Universidad de California - Davis / Berkeley, se realizaron pruebas para validar la relación entre la saturación y la formación de surcos en las bases de pavimento de hormigón permeable adoquinado. *“Debido a la alta relación de huecos de los materiales base permeables y la saturación frecuente que es una parte inherente de cualquier sistema de pavimento permeable, la resistencia de la sección transversal del pavimento puede ser mucho menor que con un pavimento tradicional. En las calles de mayor volumen, la resistencia reducida de la base y la subbase puede tener un efecto pronunciado en el rendimiento del pavimento”* (Sikich, 2017).

Esta investigación ha hecho de referencia para la Guía de diseño de pavimentos permeables de Caltrans (Caltrans Pervious Pavement Design Guidance). Todos los diseños de secciones tipo de esta guía y similares coinciden en que este tipo de diseños es bueno para volúmenes bajos, pero que precisan de bases permeables más gruesas o estabilizadas si se pretende un mayor volumen.

Por tanto, si lo que se pretende es una solución definitiva de los asientos diferenciales de nuestro caso práctico, sin renunciar a la superficie adoquinada, se deberán contemplar alternativas relacionadas con las capas bajo los adoquines.

A continuación, se exponen las distintas soluciones a contemplar para mejorar la resistencia de las plazas y evitar los asientos diferenciales sin afectar a la permeabilidad.

3.2.1. ALTERNATIVAS VALORADAS

3.2.1.1. Alternativa cero: no actuación.

Como en toda valoración de alternativas, existe la posibilidad de no actuar. En un aparcamiento de 25 años de vida útil, no sería necesaria una actuación siempre y cuando los asientos diferenciales no afectasen a su utilización (ELS).

Dentro de la alternativa cero hay otra posibilidad, la de realizar un nuevo relleno con base bajo los firmes afectados, añadiendo más material o sustituyendo por completo toda la base con un pequeño abombamiento que se compactase e igualara el nivel inicial, sin cambiar los geosintéticos ni añadir más refuerzo. De esta manera, se solventaría temporalmente el problema de los asientos diferenciales, pero no de forma definitiva.

Esta alternativa resulta la más económica (tanto la de no actuación, sin coste, como la de relleno, con un coste reducido de tan solo el material granular), pero no se puede valorar únicamente el coste económico de la actuación. Dado que se trata de un aparcamiento experimental, se debe tener en cuenta el valor del aprendizaje sobre firmes permeables y geosintéticos. La obtención de un método satisfactorio de refuerzo para este tipo de aparcamientos resultaría muy interesante.

3.2.1.2. Alternativa uno: geosintéticos.

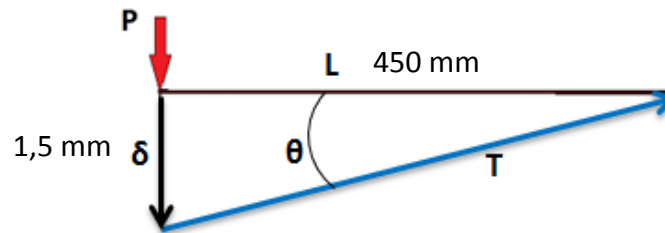
Dada la necesidad de refuerzo y de mantener la permeabilidad, se puede descartar de forma directa algunos de los geosintéticos repasados. Es el caso de los geotextiles no tejidos, que no poseen las cualidades necesarias para servir de refuerzo; y de las geomembranas, que pueden utilizarse como refuerzo en algunos casos pero cuya función impermeabilizante es contraproducente en nuestro aparcamiento.

Las alternativas que sí se barajan son las de los **geotextiles tejidos** y las **geomallas**, dado que el espaciado entre sus fibras permite la filtración de agua, y sus características les permiten mayores capacidades de carga que sus semejantes no tejidos. También se va a valorar el uso de geoceldas, que como se ha visto en el apartado de estudio de implantación y diseño de geosintéticos en capas de firme, precisan de un estudio aparte para su diseño.

En primer lugar, habrá que analizar si es posible usar geotextiles o geomallas para el caso práctico que nos ocupa. Como ya se ha dicho, el peso a soportar es el de un vehículo ligero (6 toneladas). Es decir, son 3 toneladas por eje, haciendo la suposición de que el peso se reparte de igual manera en el eje trasero y delantero, y 1,5 toneladas recaen en cada neumático. Si aplicamos el método simplificado del que ya se ha hablado, suponiendo una carga puntual a nivel del neumático, podremos obtener de forma aproximada la tensión a la que se ve sometido el geosintético de refuerzo.

Para ello, en primer lugar habrá que determinar en qué punto de la plaza se sitúan los neumáticos de forma general. Recordemos que, según la [Ilustración 15](#), la distancia hasta el neumático (L) marca el mayor asiento.

En una plaza de 2,4 x 4,2 m, suponiendo que el vehículo se estaciona de forma centrada y que el eje del automóvil mide de forma media 1,5 m, eso supondría una distancia L al neumático de 450 mm a lo ancho. Hemos establecido también el asiento que se consideraría admisible entre 1 y 2 mm (vamos a coger 1 mm).



$$\tan \theta = \frac{\text{asiento } \delta}{\text{distancia a neumático } L} = \frac{1,5}{450} = 0,0033$$

$$\theta = 0,19098^\circ$$

De esa forma, considerando un peso de 1,5 toneladas, la tensión en kN por metro lineal debería ser:

$$T \times \sin \theta = P$$

$$P = 1,5 \text{ ton} \times \frac{10^3 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{10 \text{ N}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ kN}}{10^3 \text{ N}} = 15 \text{ kN}$$

$$T = \sin 0,19098 \times 15 \text{ kN} = 4500 \text{ kN}$$

Este valor supera con creces lo que un geotextil tejido o una geomalla de refuerzo comercial pueden soportar, así que se podría descartar directamente su uso, dado que sería necesario la producción de un geosintético *ad hoc* para esta aplicación, resultando económicamente inviable.

A continuación se incluyen valores normales y máximos de distintas marcas comerciales:

Marca TenCate (Mirafi®)

El geosintético para refuerzo primario de esta marca se fabrica con fibras que consisten en polímeros sintéticos de cadena larga compuestos de al menos 95 por ciento en peso de poliolefinas o poliésteres. Deben formar una red estable de manera que los filamentos o los hilos conservan su estabilidad dimensional entre sí, incluidos los bordes.

Tabla 6. Tipos de refuerzo TenCate

Type	Long Term Design Strength (LTDS) kN/m (lbs/ft)	UV Resistance % strength	Ci	Cds
P1	186.32 (12,776)	70	0.8	0.8
P2	130.38 (8,940)	70	0.8	0.8
P3	91.18 (6,252)	70	0.8	0.8
P4	70.91 (4,862)	70	0.8	0.8
P8	32.58 (2,234)	70	0.8	0.8
P9	22.72 (1,558)	70	0.8	0.8
P10	13.84 (949)	70	0.8	0.8

Fuente: (Mirafi TenCate Nicolon)

El término LTDS de la tabla se refiere a la tracción ya minorada por los coeficientes de durabilidad, instalación y fluencia.

$$LTDS = \frac{T_{ult}}{FR_{inst} \times FR_{dur} \times FR_{fluenc}}$$

Es decir, es directamente el valor que soportan ya puestos en obra. Los factores de reducción son los que proporciona la propia marca, para mayor exactitud en la capacidad del geosintético en refuerzo.

Cada uno de los grupos está asociado a una geomalla y un geotextil tejido. El grupo P1, el que más tracción soporta, está asociado con el geotextil Geolon® HS2400 y la geomalla Miragrid® 24XT. Ambos soportan alrededor de 186 kN/m, un valor muy inferior al necesario para refuerzo del aparcamiento.

Marca PavCo

Los dos geotextiles tejidos que ofrecen mayor resistencia a la tensión de esta marca son el TR6000 y el TR10000, con unas resistencias a la tensión de 120 kN/m y 220 kN/m respectivamente, y elongaciones del 12 %.

Esto implica que no son aptos para las cargas necesarias en este aparcamiento.

Marca Huesker

Las geomallas Fortrac de esta reconocida marca se pueden fabricar con diferentes materiales para adecuarse a los requerimientos de cada proyecto particular. La gran flexibilidad del producto permite su manejo y su instalación sin problemas.

Fortrac T está fabricado con PET (politereftalato de etileno), y el rango de tensiones ofertadas está entre los 35 y los 800 kN/m, con un precio aproximado de 10 €/m², y Fortrac MPT está hecho de PVA (acetato de polivinilo, que ofrece una rigidez axial elevada junto con una altísima resistencia química en suelos) con resistencias a la tracción de 35 a 400 kN/m. Ambas posibilidades resultan insuficientes para nuestro refuerzo.

Como resultado de esta búsqueda queda claro que la utilización de geotextiles tejidos y geomallas de refuerzo no es viable para esta aplicación. La única opción sería el encargo de un material ad hoc, lo que obliga a adquirir rollos completos de 250 m^2 como mínimo. Estos rollos ascienden a los 10.000 € cada uno, lo que convierte esta alternativa en poco adecuada económicamente.

La otra posibilidad en el uso de geosintéticos es la **geocelda reforzada**. Tal como se ha explicado en el apartado [Metodología de diseño para geoceldas](#), el factor a tener en cuenta en este tipo de materiales es la compresión a soportar, no la tracción. Por tanto, el cálculo es mucho más sencillo. En este caso, el peso por encima de la geocelda sería únicamente el del vehículo y el de los adoquines (despreciable en relación al peso del vehículo), ya que la capa de base estaría contenida dentro de la propia geocelda.

Este tipo de geosintéticos puede estar justo debajo de los adoquines, o disponerse en la superficie, tal y como están las plazas de césped y gravilla reforzada. No obstante, si el objetivo es reforzar manteniendo los adoquines, se dispondrá bajo ellos como se explica en el apartado de metodología.

Únicamente hay que dividir el peso que recae en cada neumático (alrededor de 15 kN por neumático en el caso extremo de un vehículo ligero). Como vamos a ver, los valores que soportar las geoceldas es muy superior, así que no presentan problemas en cuanto al refuerzo de las plazas. He aquí algunas marcas comerciales que se pueden barajar para el aparcamiento:

Hidrocell de Hidrostank

“El sistema Hidrocell conforma una geoestructura plástica de alta resistencia que permite ejecutar elementos de captación pluvial, acumulación y transporte subterráneo de forma modular y sencilla. Con un montaje manual muy simple el producto admite configuraciones de distintas alturas.” (HIDROSTANK, S.L.)

Está hecho de polipropileno negro reforzado con cargas minerales, tiene unas dimensiones de $500 \times 500 \times 50\text{ mm}$, lo que representa 4 piezas por metro cuadrado. El peso específico es de $5,08\text{ kg/m}^2$ lo que implica un peso de 1,27 kg por cada módulo.



Ilustración 40. Hidrocell. Fuente: (HIDROSTANK, S.L.)

La resistencia a compresión es de 50 ton/m^2 , mucho mayor que la necesaria para nuestro aparcamiento. Es decir, que permitiría incluso un tráfico pesado, superior a las 6 toneladas y cuya capacidad de carga exceda las 3,5 toneladas.

En cuanto al drenaje, tiene una capacidad específica útil de 46 l/m^2 por lo que la permeabilidad no se verá afectada por el cambio de geosintético.

Celda de drenaje 30 mm de espesor, de Atlantis

Son estructuras tridimensionales, rectangulares y huecas, perforadas vertical y horizontalmente, fabricadas en polipropileno (PP) en color negro. Sus dimensiones son de $400 \times 610 \times 30 \text{ mm}$, por lo que el número de piezas por metro cuadrado es también de 4.

El peso específico de estas celdas es de 3 kg/m^2 , por lo que el peso por módulo es de 0,75 kg, bastante menor que el de las celdas Hidrocell.



Ilustración 41. Celda 30 mm espesor. Fuente: (Atlantis, ESPECIFICACIONES TECNICAS ATLANTIS. CELDA DE DRENAJE de 30 mm de espesor. , 2019)

La resistencia a la compresión es mayor, de 80 toneladas por metro cuadrado, muy elevada. El precio unitario de estas celdas, obtenido del cuadro de precios proporcionado por la marca, es de 9,50 € por m^2 de celda (es decir, 4 celdas).

Celda de drenaje 52 mm de espesor, de Atlantis

Son estructuras tridimensionales, rectangulares, huecas, perforadas vertical y horizontalmente, fabricadas en polipropileno (PP) y posteriormente envueltas en geotextiles. Sus dimensiones son de $265 \times 475 \times 52$ mm, por lo que en este caso el número de piezas por m^2 son 8.

Su peso específico es de $3,6 \text{ kg}/m^2$, por lo que el peso por módulo es de $0,45 \text{ kg}/m^2$. Las piezas se unen por sistema de machihembrado, y la resistencia a la compresión en vacío es de 150 toneladas por metro cuadrado.

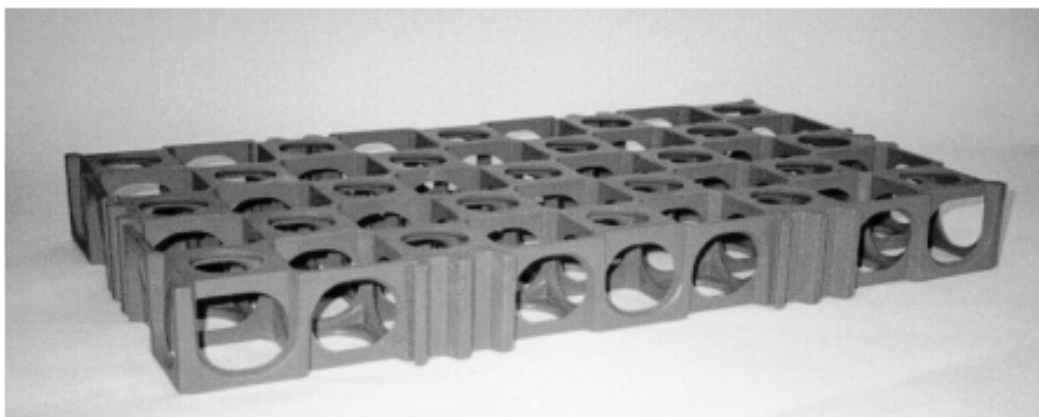


Ilustración 42. Celda 52 mm espesor. Fuente: (Atlantis, ESPECIFICACIONES TECNICAS ATLANTIS. CELDA DE DRENAJE de 52 mm de espesor. , 2019)

El precio unitario de estas celdas, obtenido del cuadro de precios proporcionado por la marca, es de 11 € por m^2 de celda (es decir, 8 celdas). El precio en puesta en obra, incluyendo la celda, su colocación y su prueba, es de $16,06 \text{ €/}m^2$.

Lo más habitual es que se dispongan en capas; bien una única capa, o dos separadas por zahorra y/o gravas (o arena) con geotextiles de por medio, aunque en función de las necesidades de la obra pueden también colocarse de forma tridimensional con el fin de aumentar su capacidad de almacenamiento o canalización. Las celdas van normalmente envueltas en geotextil, excepto si se sitúan a pie de calle (rellenas de tierra + césped o de gravas), en cuyo caso se instalaría el geotextil solo en la parte inferior. En nuestro caso, irán envueltas en geotextil puesto que se situarán bajo los adoquines.

Para zonas de aparcamiento se considera más adecuado el uso de celdas de 52mm debido a su mayor resistencia, mientras que las de 30mm son más indicadas en zonas donde las cargas a soportar son menores; como zonas verdes, peatonales o azoteas.

3.2.1.3. Alternativa dos: hormigón poroso

Existe la opción de llevar a cabo el refuerzo cambiando la morfología actual de las capas. En lugar de recurrir al uso de geosintéticos para reforzar las plazas de aparcamiento frente a asientos diferenciales, se puede sustituir parte de la base por otros materiales de características adecuadas. El material debe tener un buen comportamiento frente a cargas, y ser de permeabilidad similar a la actual.

La opción más lógica es la del hormigón poroso, ya utilizado en parte de las plazas de aparcamiento, y que ha tenido un comportamiento satisfactorio en cuanto a permeabilidad. Los asientos diferenciales de estas plazas, como ya se ha dicho, resultan casi despreciables, y se pueden achacar a una puesta en obra defectuosa, o al desgaste de la base inferior a lo largo del tiempo.

Por tanto, una posibilidad sería la de sustituir las plazas adoquinadas por otras de hormigón poroso a cara vista como las ya existentes. No obstante, si se quieren mantener los adoquines (una opción que puede resultar más estética y que puede ser un requisito en ciertas ocasiones, como es el caso de los centros históricos de las ciudades) se podría recurrir a la sustitución de parte de la base de áridos por hormigón poroso, que quedaría inmediatamente debajo de los adoquines sirviendo estos como elemento decorativo.

En primer lugar, cabe recordar que el hormigón poroso es un material diseñado con agregado de tamaño mediano y grande sin finos más pequeños como arena. La falta de finos en la mezcla crea un espacio de poro relativamente grande en el pavimento.

Es muy ligero pudiendo pesar alrededor del 70 % del peso normal de otros hormigones, pero que presenta una resistencia a la compresión bastante menor debido a los huecos necesarios para el drenaje. El uso más común de estos hormigones es para pistas de tenis y pádel y para vías de ciclismo, por lo que suelen tener además un aditivo de coloración con objetivo decorativo. Este tipo de hormigones porosos no precisa de gran resistencia a la compresión por lo que no sirve para el propósito de refuerzo.

Los pavimentos de hormigón poroso utilizan generalmente cemento Portland en combinación con diversos aditivos como superplastificantes, humo de sílice, modificadores de viscosidad e incorporadores de aire (Yang and Jiang, 2003; Andrés-Valeri et al., 2016). También existen experiencias con soluciones poliméricas, especialmente con látex poliméricos basados en polímeros tipo EVA (Yang and Jiang, 2003). El contenido de cemento suele exceder los 300 kg/m³ para aplicaciones de tráfico y los ratios de agua/cemento generalmente están por encima de 0,4 en diseños convencionales, descendiendo hasta 0,2 cuando se incluyen aditivos o soluciones poliméricas en las mezclas (ROP, 2019).

Por lo general son productos elaborados in situ, no adquiridos en plantas de hormigón. En la propia obra se mezclan cementos tipo Portland, áridos pétreos y aditivos naturales en una autohormigonera; no es un producto que se venda en sacos, ensacado o en envases dosificados.

Existen antecedentes notorios en el uso de este tipo de hormigones drenantes en aparcamientos, como es la urbanización del Estadio Wanda Metropolitano. En este caso se utilizaron dos soluciones distintas: un pavimento de hormigón drenante in situ en los aparcamientos de superficie, y un pavimento prefabricado permeable por junta en aceras y aparcamiento viario. En las plazas de aparcamiento, se usó *“hormigón drenante de 20 cm de espesor. Las especificaciones exigidas a la capa de rodadura comprendían una resistencia a compresión mayor de 15 MPa con un porcentaje de huecos efectivos superior al 20%”* (ROP, 2019).

En la Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos, del Ayuntamiento de Madrid, podemos encontrar secciones tipo de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). La sección actual de nuestro caso práctico se asemeja a la sección tipo de firme permeable por junta en aceras o paseos (con percolación al terreno). Es decir, bajo los adoquines se disponen una base, geotextil no tejido, y sub-base.

Para mejorar el comportamiento de las plazas, la sección debería asemejarse a la sección tipo de firme permeable por junta en aparcamientos, en la que se dispone hormigón poroso bajo el adoquín. A continuación, se muestra la sección tipo que nos podrá servir de guía. No obstante, esta sección tipo está pensada para aparcamientos de tráfico ocasional, por lo que se deberá considerar aumentar la resistencia del hormigón.

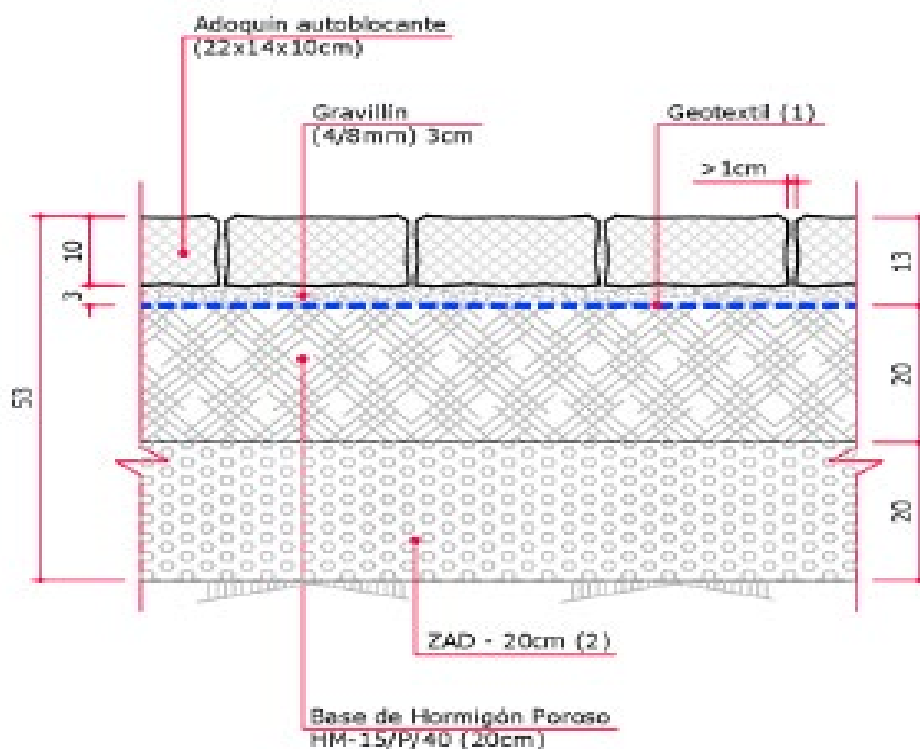


Ilustración 43. Sección tipo Firme permeable por junta en aparcamiento para tráfico ocasional

Fuente: Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos (Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, Ayuntamiento de Madrid, & Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verd, 2018)

El hormigón poroso de esta sección, un HM-15, contrasta con la EHE08 (art. 30.5), que no admite hormigones en masa de resistencia inferior a los 20 N/mm² (es decir el antiguo H-200). Hormigones más pobres sólo se admiten para elementos no estructurales como hormigones de limpieza y similares, en los que se puede englobar nuestro caso, que no es estructural. Por lo tanto se acepta el uso del HM-15, aunque se deberá considerar la posibilidad de aumentar a 20 N/mm².

Aunque las armaduras son recomendables para pavimentos de hormigón convencional industriales o en carreteras de mayor tráfico, no son necesarias para este caso, puesto que la fisuración en el hormigón no tiene los mismos efectos perniciosos que en el convencional.

He aquí un ejemplo de marcas y los productos que ofrecen este tipo de hormigones porosos o permeables:

Hormigón Poroso Drenante de Gedhosa

Datos técnicos proporcionados por Gedhosa (General de hormigones):

- Clases resistentes (Mpa): 10, 15, 20, 25.
- Consistencias (cm): Plástica.
- Tamaño máximo de árido (mm): 12, 20.
- Áridos de tamaños > 4 mm.
- Hormigones con muy bajos contenidos de árido fino o ausencia total de estos.
- Ocasionalmente pueden utilizarse aireantes en su formulación.

Cuenta con plantas cercanas a la obra, por toda Asturias, y dispone de la mejor cobertura de hormigón de todo el Noroeste de la península. Aunque actualmente no dispone de cobertura en Cantabria, sirve como referencia para un futuro por su proximidad.

Hormigón Poroso Drenante de Hormisa

Datos técnicos proporcionados por Hormisa:

- Hormigón que cumple las exigentes normas de calidad especificadas en la EHE-08. especialmente diseñado para: pistas polideportivas, zonas de tráfico ligero, urbanizaciones,...
- Utilizando áridos de tamaño máximo: 12, 20
- Resistencia: 20 y 25.
- Consistencia: plástica (P) y blanda (B)
- Ambiente: IIa, IIb y IIIa
- Relación agua – cemento: cumple con los requisitos establecidos en la EHE-08 en el artículo 37.3.2 según tabla 37.3.2a. Con una relación a/c desde 0'45 a 0'65.
- Cantidad de cemento: por encima de los requisitos establecidos en la EHE-08 en el artículo 37.3.2 según tabla 37.3.2a que especifica desde 250 a 350 Kg/m³.

3.2.2. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

Si bien se deben contemplar todas las alternativas, ha quedado patente que algunas de ellas no resultan viables para el refuerzo de estas plazas de aparcamiento adoquinadas. En primer lugar, siempre se debe contemplar la alternativa cero de no actuación, pero al tratarse de un aparcamiento experimental, debe valorarse la nueva información que la solución nos pueda proporcionar. Tanto la alternativa de no actuación como la de simple relleno no suponen un refuerzo en sí, por lo que no se pueden considerar una solución definitiva.

La alternativa de geosintéticos se ha visto reducida a las geoceldas reforzadas, puesto que, tal como indican los cálculos, para la utilización de geotextiles tejidos o geomallas de refuerzo tendríamos que decantarnos por opciones *ad hoc* de precio muy elevado. La utilización de los productos de precio más razonable resulta imposible debido a la elevada tensión que deberán soportar para un asiento diferencial igual o menor de 1,5 mm.

ALTERNATIVA	NO ACTUACIÓN	RELLENO	GEOTEXTIL GEOMALLA	GEOCELDA	HORMIGÓN POROSO
REFUERZO	X	X	SÍ	SÍ	SÍ
VIABILIDAD TÉCNICA	SÍ	SÍ	X	SÍ	SÍ

Quedan por tanto dos opciones viables que hay que comparar: las geoceldas reforzadas y el hormigón poroso. Ambas opciones implican levantar las capas superficiales de la sección: adoquines, árido calizo de base, y geotextil, por lo que no hay diferencia en este aspecto, y ambas soluciones son viables técnicamente como refuerzo de las plazas (tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados).

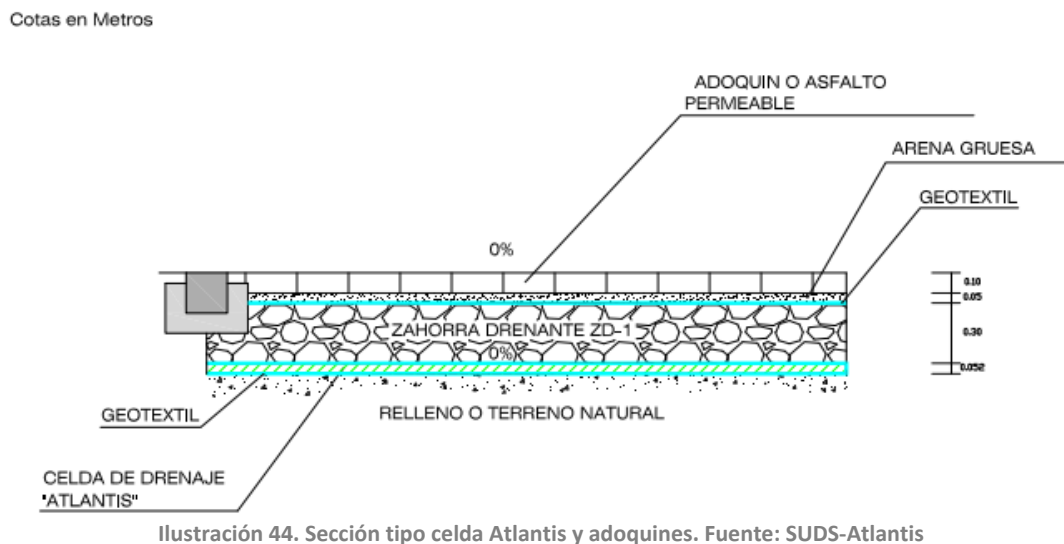
Por tanto, la elección entre ambas soluciones recae en el aspecto económico, concretamente en el coste de construcción. El coste de mantenimiento no se va a considerar puesto que la superficie se mantiene igual, y no habrá cambios a ese respecto. De la misma forma, no habrá ninguna variación en el impacto visual de las plazas.

Si tomamos como alternativa de geocelda la celda de 52 mm de espesor de Atlantis, el precio de material, colocación y prueba es de 16'06 €/m², según guía de precios de la propia marca. En el caso del hormigón poroso, según el generador de precios del Banco BEDEC 2019 el precio de un pavimento de hormigón poroso de 15 cm de espesor es de 50,21552 €/m², incluyendo mano de obra y maquinaria.

El coste del resto de la operación, en ambas alternativas, debería ser similar puesto que se pretende reutilizar en la medida de lo posible el material retirado de las capas superiores, excluyendo el geotextil existente, que no podrá reutilizarse. No obstante, hay algunos cambios sustanciales en la disposición, como la doble capa de geotextil para envolver las celdas de drenaje, por lo que se debe hacer un estudio económico aparte para cada uno.

Celda de drenaje Atlantis 52 mm de espesor:

La propia marca sugiere una sección tipo, que podemos adecuar a los materiales disponibles para la reutilización del material ya existente en las plazas:



Por tanto, se puede optar por sustituir la arena gruesa por los 7 cm de arena gruesa de árido calizo ya existente en las plazas, del cual ya conocemos las características y podemos asegurar que cumplen con los requerimientos permeables. De los 35 cm de zahorra drenante también podrá reutilizarse 30 cm, dejando los cinco centímetros restantes para la colocación de la celda de drenaje Atlantis tal y como se expone en la anterior ilustración. A continuación, una valoración económica de la sección adaptada a los cambios realizados. Ha de tenerse en cuenta que para la reutilización de las capas granulares se va a considerar un porcentaje de reutilización de 80 %, por lo que sí se debe añadir un coste de material nuevo del 20 % para cada caso:

Nº	Unidad de obra	Coste unitario (€)	Medición (ud)	Coste total (€)
1	M2 de geotextil separador entre celda drenante y explanada	1,15	1	1,15
2	M2 de celda drenante 52 mm ATLANTIS, colocada y probada	16,06	1	16,06
3	M2 de geotextil separador entre celda drenante y subbase	1,15	1	1,15
4	M3 de zahorra drenante	19,17	0,3 20 % de 0,3=0,06	5,75 1,15
5	M2 de geotextil separador entre subbase y base	1,15	1	1,15
6	M3 de arena gruesa	14,51	0,1 20 % de 0,1=0,02	1,45 0,29

7	M2 de adoquines	16,00	1 20 % de 1 = 0,2	16,00 3,2
TOTAL (€)				24,15

Este total por M2 se basa en los precios proporcionados por la propia marca (los precios son estimados y se han tomado de la base de precios PREOC 2005, pudiendo variar según la disponibilidad y distancia de transporte), menos el 80 % de las capas de materiales que se estima que se podrán reutilizar. En caso de escogerse esta opción, habrá que variar el cálculo para los precios del material del que disponemos, que pueden coincidir o no con los proporcionados por la base de precios PREOC.

El material granular podría no cumplir los valores exigidos en áridos reciclados. Según la Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) y el PG3, estos áridos deben cumplir unas especificaciones en cuanto a contenido de materia orgánica (<0,2%), valor de coeficiente de Los Ángeles mínimo (40), así como pasar un análisis de control de los áridos reciclados con ensayos de colapso (NLT 254) e hinchamiento (UNE 103601). En caso de no cumplir, el gasto de la sección de geocelda con nuevo material podría llegar a los 42,71 €/m².

Nº	Unidad de obra	Coste unitario (€/ud)	Medición (ud)	Coste total (€)
1	M2 de geotextil separador entre celda drenante y explanada	1,15	1	1,15
2	M2 de celda drenante 52 mm ATLANTIS, colocada y probada	16,06	1	16,06
3	M2 de geotextil separador entre celda drenante y subbase	1,15	1	1,15
4	M3 de zahorra drenante	19,17	0,3	5,75
5	M2 de geotextil separador entre subbase y base	1,15	1	1,15
6	M3 de arena gruesa	14,51	0,1	1,45
7	M2 de adoquines	16,00	1	16,00
TOTAL (€/m²)				42,71

No obstante se ha estimado que con una reposición de material del 20 % será suficiente para cumplir las especificaciones.

Hormigón poroso

La alternativa de refuerzo con hormigón poroso, aunque resiste más que la solución de geoceldas, es sustancialmente menos económica, puesto que la sola instalación de la capa de hormigón poroso de 20 cm ya sobrepasa los 50 €/m². Si se compara el coste material únicamente, el coste de una capa de espesor 20 cm de hormigón es de 26 euros por metro cuadrado, respecto a los 16,06 euros por metro cuadrado de la celda (menor aún si se tiene en cuenta que este precio incluye colocación y pruebas), siendo incluso superior al coste material de toda la alternativa de celda de drenaje incluyendo capas granulares y geotextiles de separación.

Nº	Descripción	Precio (€/ud)	Medición (ud)	Coste total (€)
1	H Oficial 1ª colocador	19,62	0,8	15,696
2	H Peón	17,34	0,84	14,5656
3	M3 Hormigón Poroso de consistencia fluida, tamaño máximo de árido de 12 mm, con una porosidad de 20 %	130,00	0,20	26,00
4	% Gastos auxiliares de mano de obra	30,26160	0,0150	0,45392
COSTE DIRECTO (€/m²)				56,71552

Por tanto no es necesario valorar el coste total de la sección para ver que la solución más económica es la geocelda reforzada de 52 mm de espesor de Atlantis. Dado que el presente trabajo es un estudio de alternativas, no se va a llevar a cabo un presupuesto completo de cada alternativa, que corresponde al Proyecto Constructivo de la actuación de refuerzo. Basta una comparación de costes por metro cuadrado para optar por la mejor alternativa.

En conclusión, esta solución de celdas de drenaje reúne todos los requisitos de refuerzo, permeabilidad y viabilidad económica. La resistencia a la compresión de 150 toneladas por metro cuadrado es más que suficiente para vehículos ligeros y pesados en plazas de aparcamiento, como ya hemos visto, y permite reutilizar gran parte del material, resultando sustancialmente más económica que el resto de opciones.

3.3. PROPUESTA FINAL DE ACTUACIÓN

Si bien el presente trabajo es un Estudio de Alternativas, y aunque la descripción detallada del proceso constructivo corresponde a un Proyecto Constructivo, es conveniente realizar una definición de las actuaciones correspondientes a la alternativa escogida. A continuación, se expone un resumen de dichas actuaciones, con sus unidades de obra, presupuesto y planificación temporal, desarrollados en menor detalle que un proyecto como tal.

3.3.1. DESCRIPCIÓN

La propuesta final de actuación se basa en la utilización de celdas de drenaje con una gran capacidad de refuerzo. Esta solución permite mantener la capacidad de drenaje de las plazas de aparcamiento, sustituyendo los geosintéticos actuales (que únicamente contemplaban el drenaje y la separación de las capas granulares, sin contribuir a la resistencia de las plazas frente a las cargas de los vehículos).

La colocación de celdas de refuerzo aporta una resistencia a la compresión del orden de las 150 toneladas por metro cuadrado, lo que permite la utilización de las plazas para el estacionamiento de vehículos, tanto ligeros como pesados, sin riesgo de desarrollar nuevos asientos diferenciales. De este modo se logra un margen de seguridad muy apropiado para este caso particular, dado que en el mismo Parque de las Llamas existe un aparcamiento de caravanas y se organizan eventos de todo tipo, influyendo ambos factores en la presencia de vehículos pesados en el aparcamiento experimental. Sus características resistentes y de drenaje, así como su disponibilidad y coste, convierten a estas celdas en la mejor alternativa para el caso práctico que nos ocupa, si bien no tiene por qué ser la mejor opción en el refuerzo de otros firmes permeables. Como ya hemos visto, existen otras posibilidades a tener en cuenta en función del refuerzo requerido y del tipo de firme, ya que la necesidad de reducir el asiento a tan solo 1,5 mm en cargas estáticas (por ser un estacionamiento) puede diferir de las necesidades de otras obras como carreteras o empedrado de calles.

En cuanto al resto de la sección, se conservará gran parte de las capas ya existentes, de forma que pueda reutilizarse el máximo posible de material y reducirse el coste económico y ambiental de la actuación final. Para la utilización de las capas granulares, se van a considerar porcentajes de reutilización del 80 %, aportando un 20 % de material nuevo para el que se considera el mismo coste del material que en su día se utilizó. De la misma forma, es recomendable realizar una retirada manual de los adoquines, en lugar de utilizar medios mecánicos, para evitar su daño durante el proceso y permitir su utilización de nuevo en las plazas, para lo que se va a considerar el mismo porcentaje que para las capas granulares. Como puede verse en las fotografías de las plazas, una pequeña parte de los adoquines ha sido dañada a lo largo del tiempo, especialmente aquellos más cercanos a los límites de la pletina rígida y a las arquetas. De esa forma, tanto si se daña parte de los adoquines durante el proceso como si no, podrá renovarse la porción del adoquinado que presente defectos por su utilización continuada.

Dado que las celdas de drenaje precisan de geotextiles suplementarios para separar las capas, se ha contemplado la posibilidad de reutilizar el ya existente para ese fin, pero la retirada de geotextiles de estas características suele dañar el producto, imposibilitando su reutilización en buenas condiciones. El coste de estos geotextiles se considerará el mismo de los presentes en las plazas, puesto que las especificaciones de refuerzo se aplican únicamente a la celda de drenaje. Los geotextiles en la nueva sección mantienen la separación y el drenaje, sin necesidad de soportar tensiones de ningún tipo, por lo que no precisan estar tejidos ni anclados a los extremos.

La sección final, adaptada desde la sección sugerida por la firma Atlantis, implica variar la colocación de la celda de drenaje. Tal y como se puede ver en la [Ilustración 44](#), la celda de drenaje suele colocarse entre la sub-base y el terreno natural. No obstante, en el caso particular que nos ocupa no hay contacto con el terreno natural, puesto que la sub-base se dispone sobre la impermeabilización rígida de la piscina estanca que conforma las plazas. Por tanto tiene más sentido la disposición de la celda de drenaje entre la base y la sub-base, de forma que se puede reducir el geotextil de separación a tan solo uno, en la cara superior de las celdas de drenaje, de forma que impida la mezcla de arena gruesa caliza con la sub-base (árido calizo o zahorra drenante, dependiendo del tipo de plaza).

Teniendo todo lo anterior en cuenta, se presenta a continuación la propuesta final de sección:

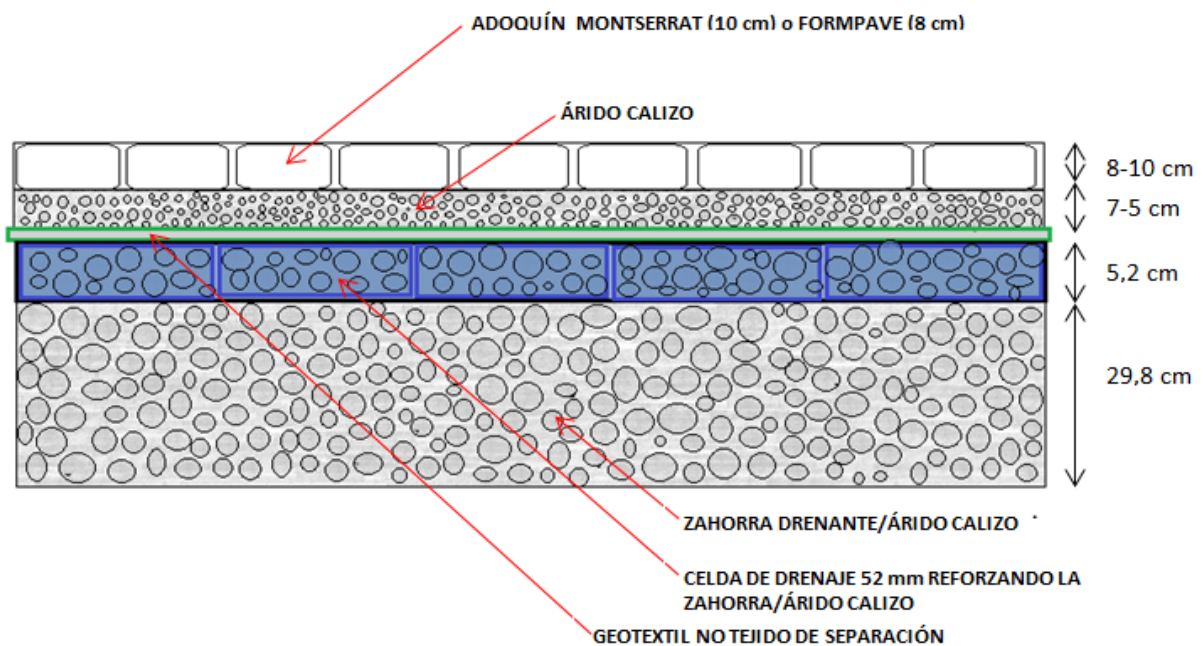


Ilustración 45. Sección final de la actuación, plazas adoquinadas. Fuente: propia.

El espesor de la capa de arena gruesa caliza depende del espesor del adoquín, siendo de 5 cm para los adoquines Montserrat de 10 cm de espesor, y 7 cm para los Hanson Formpave de 8 cm. Esto se debe a la necesidad de mantener 50 cm de espesor de la sección en total para que el nivel de la superficie coincida con el de la pletina rígida.

3.3.2. UNIDADES DE OBRA

A continuación, se realiza un breve repaso de las principales unidades de obra de la propuesta, incluidos los materiales básicos a utilizar.

UD01: RETIRADA DEL ADOQUINADO

Esta unidad consiste en la retirada de los adoquines que conforman la capa superior del firme, de forma manual dada la necesidad de utilizar aquellos que se mantengan en buen estado para su utilización posterior. De esa forma, se deberán retirar de forma manual por los operarios en vez de incluirse en la unidad de excavación general, y almacenarse de forma adecuada durante el proceso. Como se puede ver en la fotografía, la retirada manual de adoquines es sencilla y no tiene por qué dañar las piezas:



Ilustración 46. Retirada manual de los adoquines. Fuente: elaboración propia

Aquella fracción que no se pueda utilizar en la reconstrucción de la sección deberá ser llevada a vertedero por el Contratista. La medición y abono de esta unidad de obra se hará en M2 retirados, y comprenderá la retirada manual, el almacenamiento y limpieza de los adoquines en buen estado, y el aporte a vertedero de aquellos que no se puedan usar.

m ² Pavimento de adoquines			
Descripción	Rendimiento	Precio (€)	Importe
Capataz	0,0750	22,81	1,71
Oficial 1ª	0,7500	22,72	17,04
Peón ordinario	0,7500	19,74	14,81
Clase: Mano de Obra			33,56
Clase: Maquinaria			0,15
Costes directos			33,71
Costes indirectos			1,68
Coste total			35,39 €

UD02: EXCAVACIÓN

Esta unidad comprende la excavación de las capas de áridos y zahorra existentes, incluyendo la retirada del geotextil que los separa. Para ello se incluye también la preparación y protección de las zonas contiguas, y la retirada de los materiales para su posterior clasificación y tratado. El contratista es responsable de la adopción de medidas de seguridad, así como de evitar daños a las personas y bienes cercanos. Esto implica un especial cuidado en las arquetas y en la impermeabilización de la piscina estanca que envuelve las plazas, elementos que se deberán proteger durante el proceso. En la siguiente fotografía, se puede ver la arqueta de las plazas adoquinadas.



Ilustración 47. Arqueta de las plazas adoquinadas. Fuente: elaboración propia

Al final de cada jornada, se deberán proteger los materiales excavados dada la intención de mantenerlos en buen estado para su posterior utilización. Los materiales que no se puedan reutilizar se llevarán a vertedero, por lo que es responsabilidad del Contratista la obtención de los permisos pertinentes.

La excavación se abonará en M3 incluyendo el tratado del material reutilizable, y el transporte y tasas de vertedero del no reutilizable.

M³ Excavación			
Descripción	Rendimiento	Precio (€)	Importe
Capataz	0,0010	22,81	0,02
Peón ordinario	0,0100	19,74	0,20
Pala señalista	0,0100	19,74	0,20
Bulldozer	0,0050	120,92	0,60
Retroexcavadora	0,0050	120,92	0,60
Dúmpper articulado	0,0130	49,10	0,64
Clase: Mano de Obra			0,42
Clase: Maquinaria			1,84
Costes directos			2,26
Costes indirectos			0,14
Coste total			2,40 €

UD03: ZAHORRA DRENANTE SIN FINOS ZAD20

Esta unidad de obra comprende la extensión de una capa granular drenante, compuesta por un árido calizo sin finos que dificulten la permeabilidad. La procedencia será de un 80 % del propio material excavado, y un 20 % de cantera, dentro del huso granulométrico indicado.

Se extenderá el material con los espesores indicados, una vez comprobado el estado del material reciclado y su cumplimiento de las especificaciones y las tolerancias aceptables según el artículo 500.4 del PG-3. Se procederá a la humectación y compactación de la misma hasta obtener la densidad igual o superior al 98 % del Proctor modificado.

La medición y abono de la unidad de obra se realizará en M3 realmente ejecutados, según el precio indicado más adelante y que comprende todas las operaciones y materiales necesarios para su terminación.

m³ Zahorra drenante sin finos			
Descripción	Rendimiento	Precio (€)	Importe
Capataz	0,0030	22,81	0,07
Peón ordinario	0,0150	19,74	0,30
Pala mixta de peso 9 Tn	0,0150	43,91	0,66
Rodillo vibratorio de 0,8 m de anchura	0,0150	25,12	0,38
Material granular drenante	1,6000	8,54	13,66
Clase: Mano de Obra			0,37
Clase: Maquinaria			1,04
Clase: Material			13,66
Costes directos			15,07
Costes indirectos			0,90
Coste total			15,97 €

UD04: GEOCELDAS DE REFUERZO

Esta unidad de obra comprende la puesta en obra y las pruebas de calidad de las geoceldas drenantes Atlantis de espesor 52 mm. Deberá cuidarse su transporte y almacenamiento de forma que no soporten esfuerzos de tensión para los que no están preparadas, ni sean dañadas por radiación solar.

Su colocación deberá solaparse con la de la sub-base, dado que las celdas estarán rellanas de este material por su trabajo en confinamiento. Cuando la capa de zahorra tenga un espesor de 29,8 cm y esté correctamente compactada, se dispondrán las celdas y rellenarán con el resto del material para cubrir el total de 30 cm sobre la impermeabilización, siguiendo las indicaciones del fabricante. Una vez colocadas, se harán las pruebas recomendadas para comprobar su trabajo a compresión y el correcto funcionamiento de la celda con la sub-base. En la fotografía proporcionada por la marca, se ve un ejemplo de prueba de las celdas in situ.



Ilustración 47. Prueba de las geoceldas de refuerzo. Fuente: Atlantis S.A

La medición y abono de este proceso se realiza en M2 de celdas, nunca en unidades de celda, y comprende tanto el material como su colocación y prueba.

m² de drenaje Atlantis de dimensiones 52x260x475mm, colocada y probada.		
Descripción	Precio (€)	Importe
Celda de drenaje Atlantis de dimensiones	16,06	16,06
Costes directos		16,06
Costes indirectos		0,80
Coste total		16,86 €

UD05: GEOTEXTIL

La colocación de M2 de geotextil será la misma que la del tipo ya existente, Polyfelt TS-30, y ya se ha determinado que deberá ser de nueva adquisición por la imposibilidad de reutilizar en buenas condiciones en actual. Se dispondrá solo una capa de geotextil dada las características de la sección, distinta de la disposición inicial que sugiere la marca suministradoras de geoceldas. Como la función de este geotextil es la de hacer de filtro para evitar el traspaso de partículas de una capa a otra, se dispondrá entre la base y la sub-base, y en este caso concreto, entre la base y la celda de drenaje que confina parte de la sub-base.



Ilustración 48. Geotextil no tejido tipo Polyfelt TS-30. Fuente: TenCate Mirafi

Se deberá adecuar al artículo 290 del PG-3. Es importante la comprobación de su calidad y de que no haya sufrido daños mecánicos durante su transporte y colocación, por lo que se deberá mantener alejado de objetos cortantes o punzantes, siguiendo las indicaciones del fabricante. Llegarán a obra en forma de rollos y en embalajes opacos para evitar cualquier daño por radiación solar. No obstante dado que sus características no son de refuerzo, no se anclará ni dispondrá en tensión.

Se mide y abona en M2 realmente ejecutados, incluyendo todo el transporte, almacenamiento, colocación y comprobaciones de calidad. Dado que no se trata de un geosintético ad hoc, la marca permite la adquisición de los M2 a utilizar, sin obligación de comprar rollos de determinada extensión y desperdiciar el sobrante.

m ² Geotextil			
Descripción	Rendimiento	Precio (€)	Importe
Capataz	0,0020	22,81	0,05
Peón especialista	0,0100	19,94	0,20
Peón señalista	0,0100	19,74	0,20
Geotextil como elemento de filtro	1,0000	0,90	0,90
Clase: Mano de Obra			0,45
Clase: Material			0,90
Costes directos			1,35
Costes indirectos			0,08
Coste total			1,43 €

UD06: ÁRIDO DRENANTE PARA BASE

Esta unidad se define como la capa granular drenante de árido calizo sin finos, y al igual que la zahorra, procederá en un 80 % del material excavado y en un 20 % del machaqueo y trituración de piedra caliza en cantera, con el huso granulométrico indicado. Por tanto, se mantendrán las especificaciones de cada plaza (4-8 mm para las plazas Montserrat y 2-6 mm para las Formpave).

Se deberán cumplir todas las especificaciones del artículo 510 del PG-3.

Los áridos de nueva aportación se transportarán a obra en camiones de caja lisa y estanca, perfectamente limpia y protegida, con las medidas pertinentes para reducir tanto segregación como variaciones de la humedad. De forma previa al extendido del material habrá que comprobar que la superficie tenga las condiciones previstas de calidad, con especial cuidado durante esa comprobación para no dañar el geotextil sobre el que se dispone esta capa granular.

Se extenderá y compactará en una sola tongada debido al espesor reducido de la capa. La medición se realiza en M3 realmente ejecutados e incluye todas las operaciones antes mencionadas.

m³ Árido drenante para base			
Descripción	Rendimiento	Precio (€)	Importe
Capataz	0,0030	22,81	0,07
Peón ordinario	0,0150	19,74	0,30
Pala mixta de peso 9 Tn	0,0150	43,91	0,66
Rodillo vibratorio de 0,8 m de anchura	0,0150	25,12	0,38
Árido drenante para base	1,7000	9,58	16,29
Clase: Mano de Obra			0,37
Clase: Maquinaria			1,04
Clase: Material			16,29
Costes directos			17,70
Costes indirectos			1,06
Coste total			18,76 €

UD07: PAVIMENTO DE ADOQUINES

Esta unidad consiste en la colocación de los adoquines correspondientes a cada plaza, manteniendo los actuales Montserrat y Hanson Formpave dada la decisión de reutilizar el máximo material posible. A pesar de ello, solo el 80 % de los adoquines procederán de la propia obra, puesto que un 20 % deberán ser de nueva adquisición para sustituir aquellos dañados durante la excavación o aquellos que ya presentarán daños antes de la misma.

Estos adoquines se colocarán a tope, confinados, sin recebo y en forma de espina de pez, de igual forma a como estaban para un mejor reparto de los esfuerzos torsores. Se dispondrán sobre la base de arena gruesa caliza, cuya compactación se realizará una vez colocados los adoquines. De esta forma se evita la pérdida de trabazón. A continuación, una fotografía de la colocación de los adoquines actual, ligeramente hincados y sin recebo:



Ilustración 49. Colocación actual de los adoquines. Fuente: elaboración propia.

Durante la colocación y compactación, así como en el control de calidad de producto terminado, deberá asegurarse el mantenimiento de la permeabilidad anterior de las plazas, de permeabilidad superficial mayor de $25 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$.

Su puesta en obra incluye la preparación y comprobación de la superficie de asiento, así como la ejecución de la base de arena, la colocación de los propios adoquines y el planchado y limpieza del pavimento terminado si procede, para evitar la colación de finos que reduzcan la permeabilidad. La colocación ha de realizarse a mano, mediante golpeo con martillo de goma, para realizar un principio de hinca sin dañar el producto, pero asegurando la rasante definida en proyecto. Tras la colocación se realizará un planchado con rodillo metálico vibrante de mano, y la limpieza pertinente.

Dada la necesidad de comprobar que el refuerzo escogido tiene un buen comportamiento, puesto que se trata de una alternativa poco frecuente y se deberá vigilar su comportamiento a lo largo de la vida útil del aparcamiento, es necesario un

control estricto de la nivelación en obra. Esta no podrá diferir más de 2 mm de la pletina rígida perimetral.

Las zonas que no cumplan dichas tolerancias o que presenten defectos en la permeabilidad deberán ser corregidas por el contratista de acuerdo a lo que ordene el Director de Obra.

La unidad de obra de adoquines se medirá y abonará en M2 de superficie realmente ejecutados, incluyendo el coste del material nuevo aportado y todas las operaciones pertinentes del material nuevo y antiguo.

m² Pavimento de adoquines			
Descripción	Rendimiento	Precio (€)	Importe
Capataz	0,0750	22,81	1,71
Oficial 1ª	0,7500	22,72	17,04
Peón ordinario	0,7500	19,74	14,81
Compactador vibratorio de bandeja	0,0500	3,08	0,15
Pieza prefabricada de hormigón	1,0000	9,80	9,80
Arena (0-6 mm)	0,1000	10,71	1,07
Clase: Mano de Obra			33,56
Clase: Maquinaria			0,15
Clase: Material			10,87
Costes directos			44,58
Costes indirectos			2,67
Coste total			47,25 €

3.3.3. ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Para realizar una estimación económica es necesario establecer las mediciones más significativas de las unidades de obra descritas.

Las plazas adoquinadas son de 2,4 x 4,2 m (una superficie de 10,08 m²), excepto dos plazas destinadas a vehículos para personas con discapacidad, de 4,2 x 4,8 m (20,16 m²). La superficie total de cada tipo de plaza adoquinada es:

- ❖ **SUPERFICIE TIPO A:** adoquines Hanson Formpave[®], plazas 1-10. Son 9 plazas de dimensiones normales, 10,08 m², y una de superficie aumentada (la plaza 1), 20,16 m². La superficie total de estas plazas es de **110,88 m²**.
- ❖ **SUPERFICIE TIPO B:** adoquines para pavimentos Montserrat[®], plazas 11-19. Son 8 plazas de dimensiones corrientes y una de superficie aumentada (la plaza 11). El total de superficie de estas plazas es de **100,8 m²**.

El total de superficie que precisa de intervención de refuerzo es de **211,68 m²**, teniendo en cuenta que el refuerzo se va a centrar en las plazas de adoquines.

Como se puede ver en la [Ilustración 45. Sección final de la actuación](#), el espesor de la capa de zahorra drenante (29,8 cm) se mantiene constante para cada tipo de adoquín, pero debido a la variación de espesor de los adoquines Montserrat (10 cm de espesor) frente a los Hanson Formpave (8 cm de espesor), la capa de árido calizo es de distinto espesor, por lo que las mediciones de cada tipo de plaza se diferenciarán en ese aspecto. De esa forma, el total a excavar en las de tipo A (Hanson Formpave) es de 42 cm, y en las de tipo B (Montserrat) es de 40 cm de espesor.

Los costes se han obtenido de los precios facilitados por las propias empresas consultadas, así como los obtenidos del PREOC, calculados a partir de los costes unitarios de cada unidad de obra definida anteriormente.

A continuación, se expone el presupuesto por capítulos diferenciando entre las plazas tipo A y tipo B debido al cambio en sus mediciones.

1	Plazas tipo A (1-10) adoquines Hanson Formpave [®]			
Cod.	UNIDAD DE OBRA	MEDICIÓN	PRECIO	IMPORTE
U01	M2 RETIRADA DEL ADOQUINADO	110,88	35,39	3.924,04
U02	M3 EXCAVACIÓN	4.656,96	2,40	11.176,70
U03	M3 ZAHORRA DRENANTE SIN FINOS ZAD20	*660,84	15,97	10.553,68
U04	M2 GEOCELDAS DE REFUERZO	110,88	16,86	1.869,44
U05	M2 GEOTEXTIL	110,88	1,43	158,56
U06	M3 ÁRIDO DRENANTE PARA BASE	*155,23	18,76	2.912,15
U07	M2 PAVIMENTO DE ADOQUINES	*22,176	47,25	1.047,82
Total capítulo 1 (€)				31.642,39

2	Plazas tipo B (11-19) adoquines Hanson Formpave®			
Cod.	UNIDAD DE OBRA	MEDICIÓN	PRECIO	IMPORTE
U01	M2 RETIRADA DEL ADOQUINADO	100,80	35,39	3.567,31
U02	M3 EXCAVACIÓN	4.032,00	2,40	9.676,80
U03	M3 ZAHORRA DRENANTE SIN FINOS ZAD20	*600,77	15,97	9.594,30
U04	M2 GEOCELDAS DE REFUERZO	100,80	16,86	1.699,49
U05	M2 GEOTEXTIL	100,80	1,43	144,14
U06	M3 ÁRIDO DRENANTE PARA BASE	*100,8	18,76	1.891,01
U07	M2 PAVIMENTO DE ADOQUINES	*20,16	47,25	952,56
Total capítulo 2 (€)				27.525,61

Las mediciones señaladas con un asterisco son el resultado de multiplicar la superficie por el espesor, pero del que se ha cogido solo el 20 % debido al uso reciclado del 80 % restante.

TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL	59.168 €
13 % Gastos Generales	7.691,84 €
6 % Beneficio Industrial	3.550,08 €
TOTAL DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	70.409,92 €
21 % IVA	14.786,08 €
TOTAL PRESUPUESTO C/IVA	85.196,00 €

Asciende el presupuesto estimado de la propuesta de actuación a la expresada cantidad de:

OCHENTA Y CINCO MIL CIENTONOVENTA Y SEIS EUROS CON CERO CÉNTIMOS.

3.4. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Aunque el objetivo de refuerzo de las plazas de aparcamiento adoquinadas ya ha sido solventado con la actuación propuesta, no eran las únicas plazas que presentaban asientos diferenciales. Como se ha visto en el apartado de Descripción de firme y condiciones, las plazas de grava reforzada con celdas de plástico y las de césped reforzado con celdas de hormigón también presentan asientos diferenciales importantes, aunque no tan notables como las de adoquines.

La solución adoptada para las plazas adoquinadas puede adecuarse a este tipo de estacionamientos, con celda Atlantis de la misma forma que las adoquinadas, formando una sección similar que mantiene el mismo tipo de superficie permeable; o bien una sección con doble celda de drenaje, una de cara vista como las presentes, y otra de refuerzo interno.

Dadas las necesidades de refuerzo, y el interés en mantener la superficie actual (refuerzo de hormigón con césped y de plástico con grava), la propuesta más adecuada es la sección una única celda de refuerzo interno, con una resistencia más que adecuada para vehículos ligeros y pesados.

De la misma forma que en los anteriores, considerando que se pueda reutilizar parte del material, el coste total por m^2 es de 20,66 €/m².

Es una buena solución que permite cierta homogeneidad en la actuación conjunta de todo el aparcamiento puesto que, al margen de la capa superficial de firme permeable, el resto de la sección es prácticamente igual. En caso de disponerse en un futuro llevar a cabo el refuerzo propuesto, deberá valorarse el estado de estas plazas también, para poder decidir si han de incluirse o no en las actuaciones.

En cuanto a las plazas de mezcla bituminosa y hormigón poroso, la recomendación de este estudio es la de no actuación, dado el buen comportamiento que han presentado frente a asientos diferenciales. La reparación del resto de sus fallos exige un estudio aparte.

4. CONCLUSIONES

A modo de conclusión, se deben dar por cumplidos los objetivos propuestos inicialmente para este Estudio de Alternativas, destacando a continuación las principales tareas llevadas a cabo y las ideas más importantes discutidas a lo largo del documento:

- ❖ Se han repasado las principales características de los geosintéticos y su tipología, fundamentalmente en base a las referencias del International Geosynthetic Society (IGS) y de diversas normas técnicas. Es importante destacar la amplia versatilidad de estos materiales en las distintas obras civiles, si bien su aplicación actual aún no está generalizada.
- ❖ Se ha analizado la aplicación de los geosintéticos en los refuerzos de carreteras, diferenciando dos métodos de cálculo distintos: uno para geotextiles/geomallas y otro para geoceldas. Fruto de este análisis se han propuesto dos metodologías de cálculo específicas de elaboración propia para refuerzo de firmes permeables, posteriormente validadas en su aplicación al caso práctico.
- ❖ Se ha diagnosticado el estado actual del aparcamiento experimental de las Las Llamas, área seleccionada como caso práctico de estudio. Partiendo de la observación y medida de los asientos diferenciales en cada tipo de plaza de aparcamiento, se ha llegado a la conclusión de que las plazas más problemáticas frente a hundimiento son las adoquinadas, debido a la transmisión puntual de las cargas a las capas inferiores. Por esta razón se ha decidido centrar el refuerzo en dichas plazas.
- ❖ Se han planteado y calculado distintas alternativas de refuerzo, tanto basadas en geosintéticos como en otros materiales alternativos. De este planteamiento han surgido las alternativas de “no actuación o relleno con bombeo”, “uso de geotextiles tejidos y geomallas”, “uso de geoceldas de refuerzo”, y “empleo de una capa inferior de hormigón poroso”.
- ❖ Finalmente, se han discutido las alternativas proponiendo un orden de prioridad de actuación. Tras el descarte del uso de geotextiles y mallas para este caso particular (firmes permeables en el Parque de Las Llamas), se han discutido las diferencias técnicas y económicas de las geoceldas de refuerzo y el hormigón poroso. Una vez determinado que ambas alternativas cumplen con los requisitos necesarios para evitar asientos diferenciales manteniendo la permeabilidad, se ha tomado la decisión en base al coste. Resultando el hormigón poroso más costoso, debido a la maquinaria y mano de obra necesarias para una actuación tan pequeña (normalmente este material se usa como capa de rodadura en grandes superficies), la propuesta final es la de utilizar geoceldas que confinen parte de la sub-base, aportando gran resistencia a la compresión.

Debido a las particularidades de cargas y permeabilidad exigidas en el caso estudiado de un aparcamiento de firmes permeables, la solución final propuesta no se puede generalizar al refuerzo de carreteras. De igual manera, es importante recalcar que la posición de la geocelda a modo de base reforzada es un aporte original probado en este estudio de forma teórica, recomendándose su validación en un tramo piloto antes de su aplicación generalizada.

Como conclusión general final, se debe destacar que los geosintéticos (incluidas las geoceldas) tienen un potencial muy elevado de desarrollo futuro, si bien es necesario un mayor conocimiento técnico para generalizar su aplicación en el sector. Se puede afirmar lo mismo acerca de los firmes permeables, cuyas ventajas superan a sus inconvenientes, a pesar de que actualmente exista una barrera de desconocimiento técnico que afortunadamente se está venciendo.

Bibliografía

- Adolfo René Fiorini García, U. d. (s.f.). Recuperado el mayo de 2019, de Aplicación de Geosintéticos en la construcción de carreteras: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2800_C.pdf
- Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, Ayuntamiento de Madrid, & Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verd. (noviembre de 2018). *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos*. Obtenido de Portal web del Ayuntamiento de Madrid: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Agua/SUDS-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/?vgnextfmt=default&vgnextoid=05ae02fc13557610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=63d0e0f6fdc4f510VgnVCM2000001f4a900aRCRD>
- Atlantis. (2019). *ESPECIFICACIONES TECNICAS ATLANTIS. CELDA DE DRENAJE de 30 mm de espesor.* .
- Atlantis. (2019). *ESPECIFICACIONES TECNICAS ATLANTIS. CELDA DE DRENAJE de 52 mm de espesor.* .
- BOE, M. d. (22 de mayo de 2018). *BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO*. Recuperado el marzo de 2019, de BOE-A-2018-6802: <https://www.boe.es/boe/dias/2018/05/22/pdfs/BOE-A-2018-6802.pdf>
- Caltrans. (s.f.). *Caltrans Pervious Pavement Design Guidance*. Obtenido de <https://dot.ca.gov/programs/design/hydraulics-stormwater>
- Española, N. (2006). *UNE EN-ISO 10318:2006*. Recuperado el marzo de 2019, de “Geosintéticos. Términos y Definiciones”: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0037404>
- Española, N. (2015). *UNE-EN ISO 10318-1:2015*. Recuperado el marzo de 2019, de Geosintéticos. Parte 1: Términos y definiciones.: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0055806>
- Fomento. (s.f.). Obtenido de Ministerio de Fomento, Gobierno de España: <https://www.fomento.gob.es/areas-de-actividad/transporte-terrestre/informacion-estadistica/datos-del-registro-general-definiciones>
- Fomento, M. d. (22 de mayo de 2018). *Art.290*. Recuperado el 2019, de Disposición 6802 del BOE núm. 124 de 2018: <file:///C:/Users/Win7%20User/Downloads/BOE-A-2018-6802.pdf>
- García Perales, M. (junio de 2014). Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de las Llamas, Santander. *Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de las Llamas, Santander*. Santander, Cantabria, España.
- General de hormigones. (s.f.). *Gedhosa*. Recuperado el 2019, de <http://www.gedhosa.es/servicios-hormigon-espana/hormigon-poroso-drenante/>
- Giroud, J., & Noiray, L. (1981). *Design of Geotextile Reinforced Unpaved Roads*. ASCE.
- GITECO, G. d. (s.f.). *Grupo de Investigación GITECO de la Universidad de Cantabria*. Recuperado el marzo de 2019, de <https://www.giteco.unican.es/ES/inicio.shtml>

- Google Maps. (2019). *Google maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/@43.4736758,-3.7996977,18z>
- GT-5. (s.f.). GT-5 USO DE GEOSINTETICOS EN FIRMES DE CARRETERAS .
- Herrador, M. F., Baamonde Roca, A., & Pérez Pérez, I. (s.f.). Geosintéticos en carreteras:Planteamientos para su aplicación en las capas de firme. *Geosintéticos en carreteras:Planteamientos para su aplicación en las capas de firme*. A Coruña, Galicia, España.
- HIDROSTANK, S.L. (s.f.). *Catálogo Nº 079.3 HIDROCELL: APLICACIONES A LOS SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE*.
- Hormisa. (s.f.). *Hormigón poroso-drenante*. Obtenido de <https://hormisa.com/hormigon/>
- International Geosynthetics Society. (s.f.). *Geosynthetics Classification*. Recuperado el 18 de marzo de 2019, de <https://www.geosyntheticsociety.org/education-resources/>: <https://www.geosyntheticsociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Classification/English.pdf>
- International Geosynthetics Society. (n.d.). *Geosynthetics Functions*. Retrieved marzo 19, 2019, from <https://www.geosyntheticsociety.org/education-resources/>: <https://www.geosyntheticsociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Functions/English.pdf>
- Jill Bicknell. (junio de 2016). *Pervious Pavement forStormwater Control:Application, Selection, and Design Considerations*. Obtenido de <https://www.flowstobay.org/sites/default/files/3-SMCWPPP-Intro%20to%20Pervious%20Pavement.pdf>
- Junta de Escuela, E. (22 de abril de 2016). *Normativa del Trabajo Fin de Grado para el Graduado en Ingeniería Civil (Menciones en Construcciones Civiles, Hidrología y Transportes y Servicios Urbanos)*. Recuperado el enero de 2019, de https://web.unican.es/centros/caminos/Documents/gic/gic_tfg_normativa.pdf
- M. Koerner, R. (2012). *Designing with geosynthetics*. Xlibris.
- Ministerio de Fomento. (2003 de 12 de 12). *NORMA 6.3-IC "REHABILITACION DE FIRMES"*. Recuperado el febrero de 2019, de ORDEN MINISTERIAL (BOE de 12-12-03): http://www.carreteros.org/normativa/firmes/6_3ic/indice.htm
- Mirafi TenCate Nicolon. (s.f.). *DG_reinforced slopes_TENCATE.pdf*.
- Pavipor. (s.f.). *pavipor.com*. Obtenido de Pavimento Hormigón poroso: <https://pavipor.com/pavimento-hormigon-poroso/>
- ROP. (marzo de 2019). Consolidando el drenaje sostenible en España. *Revista de Obras Públicas: la revista de los Ingenieros de Caminos, Puertos y Canales*.
- Sikich, A. J. (diciembre de 2017). *Storm Water Solutions*. Obtenido de <https://www.estormwater.com/grooming-grove-street>
- Tráfico, M. D. (2002). *carreteros.org*. Recuperado el febrero de 2019, de Serie normativas: Instrucciones de Construcción. Rehabilitación de firmes: http://www.carreteros.org/normativa/noc/pdfs/0_100ne/009_2002.pdf
- Valeri, V. C. (30 de noviembre de 2017). Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana. *Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana*. Santander , Cantabria, España.

Trabajos citados

- Adolfo René Fiorini García, U. d. (s.f.). Recuperado el mayo de 2019, de Aplicación de Geosintéticos en la construcción de carreteras: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2800_C.pdf
- Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, Ayuntamiento de Madrid, & Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verd. (noviembre de 2018). *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos*. Obtenido de Portal web del Ayuntamiento de Madrid: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Agua/SUDS-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/?vgnextfmt=default&vgnextoid=05ae02fc13557610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=63d0e0f6fdc4f510VgnVCM2000001f4a900aRCRD>
- Atlantis. (2019). *ESPECIFICACIONES TECNICAS ATLANTIS. CELDA DE DRENAJE de 30 mm de espesor.* .
- Atlantis. (2019). *ESPECIFICACIONES TECNICAS ATLANTIS. CELDA DE DRENAJE de 52 mm de espesor.* .
- BOE, M. d. (22 de mayo de 2018). *BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO*. Recuperado el marzo de 2019, de BOE-A-2018-6802: <https://www.boe.es/boe/dias/2018/05/22/pdfs/BOE-A-2018-6802.pdf>
- Caltrans. (s.f.). *Caltrans Pervious Pavement Design Guidance*. Obtenido de <https://dot.ca.gov/programs/design/hydraulics-stormwater>
- Española, N. (2006). *UNE EN-ISO 10318:2006*. Recuperado el marzo de 2019, de “Geosintéticos. Términos y Definiciones”: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0037404>
- Española, N. (2015). *UNE-EN ISO 10318-1:2015*. Recuperado el marzo de 2019, de Geosintéticos. Parte 1: Términos y definiciones.: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0055806>
- Fomento. (s.f.). Obtenido de Ministerio de Fomento, Gobierno de España: <https://www.fomento.gob.es/areas-de-actividad/transporte-terrestre/informacion-estadistica/datos-del-registro-general-definiciones>
- Fomento, M. d. (22 de mayo de 2018). *Art.290*. Recuperado el 2019, de Disposición 6802 del BOE núm. 124 de 2018: <file:///C:/Users/Win7%20User/Downloads/BOE-A-2018-6802.pdf>
- García Perales, M. (junio de 2014). Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de las Llamas, Santander. *Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de las Llamas, Santander*. Santander, Cantabria, España.
- General de hormigones. (s.f.). *Gedhosa*. Recuperado el 2019, de <http://www.gedhosa.es/servicios-hormigon-espana/hormigon-poroso-drenante/>
- Giroud, J., & Noiray, L. (1981). *Design of Geotextile Reinforced Unpaved Roads*. ASCE.
- GITECO, G. d. (s.f.). *Grupo de Investigación GITECO de la Universidad de Cantabria*. Recuperado el marzo de 2019, de <https://www.giteco.unican.es/ES/inicio.shtml>

- Google Maps. (2019). *Google maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/@43.4736758,-3.7996977,18z>
- GT-5. (s.f.). GT-5 USO DE GEOSINTETICOS EN FIRMES DE CARRETERAS .
- Herrador, M. F., Baamonde Roca, A., & Pérez Pérez, I. (s.f.). Geosintéticos en carreteras:Planteamientos para su aplicación en las capas de firme. *Geosintéticos en carreteras:Planteamientos para su aplicación en las capas de firme*. A Coruña, Galicia, España.
- HIDROSTANK, S.L. (s.f.). *Catálogo Nº 079.3 HIDROCELL: APLICACIONES A LOS SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE*.
- Hormisa. (s.f.). *Hormigón poroso-drenante*. Obtenido de <https://hormisa.com/hormigon/>
- International Geosynthetics Society. (s.f.). *Geosynthetics Classification*. Recuperado el 18 de marzo de 2019, de <https://www.geosyntheticsociety.org/education-resources/>: <https://www.geosyntheticsociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Classification/English.pdf>
- International Geosynthetics Society. (n.d.). *Geosynthetics Functions*. Retrieved marzo 19, 2019, from <https://www.geosyntheticsociety.org/education-resources/>: <https://www.geosyntheticsociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Functions/English.pdf>
- Jill Bicknell. (junio de 2016). *Pervious Pavement forStormwater Control:Application, Selection, and Design Considerations*. Obtenido de <https://www.flowstobay.org/sites/default/files/3-SMCWPPP-Intro%20to%20Pervious%20Pavement.pdf>
- Junta de Escuela, E. (22 de abril de 2016). *Normativa del Trabajo Fin de Grado para el Graduado en Ingeniería Civil (Menciones en Construcciones Civiles, Hidrología y Transportes y Servicios Urbanos)*. Recuperado el enero de 2019, de https://web.unican.es/centros/caminos/Documents/gic/gic_tfg_normativa.pdf
- M. Koerner, R. (2012). *Designing with geosynthetics*. Xlibris.
- Ministerio de Fomento. (2003 de 12 de 12). *NORMA 6.3-IC "REHABILITACION DE FIRMES"*. Recuperado el febrero de 2019, de ORDEN MINISTERIAL (BOE de 12-12-03): http://www.carreteros.org/normativa/firmes/6_3ic/indice.htm
- Mirafi TenCate Nicolon. (s.f.). *DG_reinforced slopes_TENCATE.pdf*.
- Pavipor. (s.f.). *pavipor.com*. Obtenido de Pavimento Hormigón poroso: <https://pavipor.com/pavimento-hormigon-poroso/>
- ROP. (marzo de 2019). Consolidando el drenaje sostenible en España. *Revista de Obras Públicas: la revista de los Ingenieros de Caminos, Puertos y Canales*.
- Sikich, A. J. (diciembre de 2017). *Storm Water Solutions*. Obtenido de <https://www.estormwater.com/grooming-grove-street>
- Tráfico, M. D. (2002). *carreteros.org*. Recuperado el febrero de 2019, de Serie normativas: Instrucciones de Construcción. Rehabilitación de firmes: http://www.carreteros.org/normativa/noc/pdfs/0_100ne/009_2002.pdf
- Valeri, V. C. (30 de noviembre de 2017). Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana. *Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana*. Santander , Cantabria, España.

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA EL REFUERZO CON GEOSINTÉTICOS DE LAS PLAZAS DEL APARCAMIENTO EXPERIMENTAL DE LA UC EN EL PARQUE DE LAS LLAMAS

Autora: Coral Cossío Abascal.

Directores: Jaime Carpio García y Jorge Rodríguez Hernández.

Titulación: Grado en Ingeniería Civil, Mención en Construcciones Civiles.

Palabras clave: refuerzo, geosintético, SUDS, firme permeable, asientos.

OBJETIVOS

La finalidad de este TFG es analizar las aplicaciones de refuerzo de firmes permeables con geosintéticos, estudiando el caso práctico del aparcamiento experimental del Parque de las Llamas. La estructura del trabajo es, por tanto, la de un Estudio de Alternativas, con una parte introductoria de los geosintéticos y una segunda parte en la que se detallan los problemas y las posibles soluciones para el caso práctico del aparcamiento de firmes permeables de Las Llamas.

Los objetivos particulares son: repasar las características de los geosintéticos; analizar su aplicación en refuerzos de carretera; diagnosticar el estado del caso práctico; plantear las alternativas y seleccionar y discutir la propuesta final.

Cabe destacar que, aunque el tema principal es el uso de geosintéticos en el refuerzo de firmes, se han valorado todas las alternativas viables, incluyendo aquellas que no contemplan dichos materiales en su solución.

GEOSINTÉTICOS

Existe un amplio abanico de aplicaciones de estos materiales en obra civil, desde la simple separación y filtrado de cualquier capa, permitiendo el drenaje en terraplenes, hasta la contención de fluidos en impermeabilizaciones, pasando por el refuerzo y el control de la erosión. Esto se debe a la versatilidad de un material polimérico que puede disponerse en forma de láminas, mallas, tejidos e incluso tubos y celdas tridimensionales.

No obstante, como ocurre en todos los productos novedosos, no se cuenta con una gran experiencia de su comportamiento tanto en laboratorio como una vez puesto en obra, por lo que la normativa técnica no siempre refleja su uso.

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA GEOTEXTIL TEJIDO O GEOMALLA

Debido a la necesidad de refuerzo, se puede descartar el uso de geosintéticos no tejidos, de poca resistencia a tracción, y de membranas impermeables que imposibiliten el drenaje.

Las alternativas que sí se barajan son las de los geotextiles tejidos y las geomallas, dado que el espaciado entre sus fibras permite la filtración de agua, y sus características les permiten mayores capacidades de carga que los no tejidos.

Este tipo de geosintéticos se colocan al nivel de los actuales, entre la sub-base y la base, pero habrán de anclarse para asegurar la tensión que garantiza una buena oposición frente al peso del vehículo y las capas intermedias.

A pesar de la existencia de métodos de cálculo para el refuerzo de carreteras con estos materiales, ninguno de ellos es aplicable a un aparcamiento de las características descritas. Esto se debe a las particulares de las cargas, que se mantienen estáticas gran parte del tiempo a diferencia de las carreteras, y a las características de algunos firmes permeables como los adoquines, que transmiten de manera casi puntual las cargas a las capas inferiores.

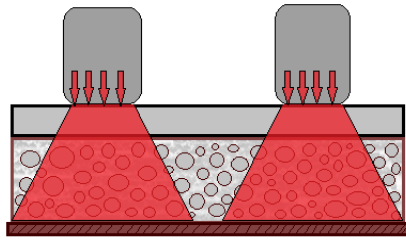


Ilustración 1. Distribución piramidal de cargas. ❌

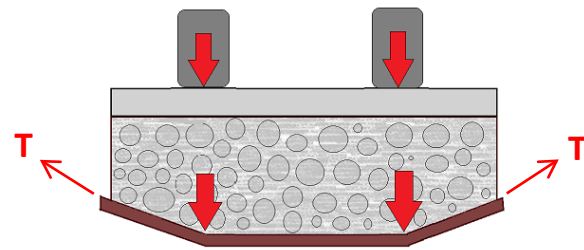


Ilustración 2. Deformación bajo carga puntual ✅

En base a estas características, se ha desarrollado un método de elaboración propia basado en la tensión que habrá de soportar el geotextil o geomalla para evitar asientos diferenciales mayores de un límite adecuado. Se debe tener en cuenta que la tracción soportada se ve en gran medida afectada por la fluencia de estos materiales.

Los resultados para las cargas pertenecientes al estacionamiento de tráfico ligero y asientos diferenciales menores a 1,5 mm son tensiones tan elevadas con baja fluencia que el uso de estos materiales queda descartado, salvo que se recurra a materiales *ad hoc*.

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA GEOCELDAS

El uso de geoceldas reforzadas, por otra parte, conlleva un estudio distinto puesto que su colocación y funcionamiento presenta diferencias importantes. Este refuerzo no se basa en la resistencia a tracción del geosintético (por lo que no debe ir anclado en sus extremos) sino que basa su capacidad de refuerzo en carretera en la compresión que pueden soportar en dirección perpendicular a su plano de colocación, por lo que el cálculo para su diseño es significativamente más sencillo, coincidiendo dicha compresión con el peso por encima de la geocelda.

De la misma forma que en la metodología anterior, se considera una transmisión puntual de las cargas en firmes como los adoquinados o las celdas. Estas geoceldas soportan compresiones muy elevadas por lo que son aptas para el caso práctico.

APLICACIÓN AL CASO PRÁCTICO

El aparcamiento experimental de Las Llamas consta de 45 plazas de aparcamiento monitorizadas, con distintos tipos de firmes permeables: dos tipos distintos de adoquines, mezcla bituminosa drenante, hormigón poroso, celdas de hormigón y celdas de plástico. De entre todos ellos, los asientos diferenciales son más notorios en las plazas adoquinadas, por lo que el refuerzo se va a centrar en dichas y extrapolarse a las demás en caso de ser necesario.

- ❖ **ALTERNATIVA CERO: NO ACTUACIÓN O RELLENO CON BOMBEO.** A pesar del coste reducido de volver a rellenar con material granular, se ha descartado esta alternativa por no tratarse de una solución de refuerzo en sí.
- ❖ **ALTERNATIVA UNO: GEOSINTÉTICOS.** Aunque usar geotextiles o geomallas no es viable debido a la tensión a soportar y al elevado precio de los materiales *ad hoc*, queda la alternativa de usar geoceldas de refuerzo.
- ❖ **ALTERNATIVA DOS: HORMIGÓN POROSO.** Las características mecánicas y drenantes de este material lo convierten en una opción a tener en cuenta para el refuerzo, a modo de capa inferior.

CONCLUSIONES Y PROPUESTA FINAL:

Una vez determinado que tanto la alternativa de hormigón poroso como la de geocelda de refuerzo cumplen con los requisitos necesarios para evitar asientos diferenciales manteniendo la permeabilidad, se ha tomado la decisión en base al coste. El hormigón poroso resulta más costoso, debido a la maquinaria y mano de obra necesarias para una actuación tan pequeña, por lo que la propuesta final es la de utilizar geoceldas que confinen parte de la sub-base, aportando gran resistencia a la compresión.

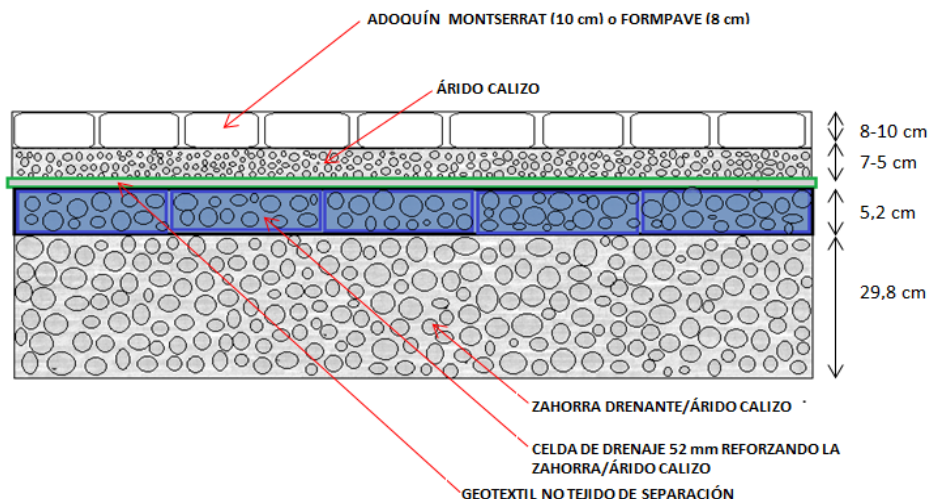


Ilustración 4. Sección final de la actuación, plazas adoquinadas.

La solución final propuesta no se puede generalizar al refuerzo de carreteras debido a las particularidades de cargas y permeabilidad exigidas en el caso particular estudiado de un aparcamiento de firmes permeables. Destacar también que la posición de la geocelda a modo de base reforzada es un aporte original probado en este estudio de forma teórica, recomendándose su validación en un tramo piloto antes de su aplicación generalizada.

Como conclusión general final, se debe destacar que los geosintéticos (incluidas las geoceldas) tienen un potencial muy elevado de desarrollo futuro, si bien es necesario un mayor conocimiento técnico para generalizar su aplicación en el sector, pudiendo afirmar lo mismo acerca de los firmes permeables, cuyas ventajas superan a sus inconvenientes, aunque actualmente aún exista una barrera de desconocimiento técnico que afortunadamente se está venciendo.

STUDY OF ALTERNATIVES FOR THE GEOSYNTHETIC REINFORCEMENT OF THE UC'S EXPERIMENTAL CAR PARK BAYS IN THE PARK OF "LAS LLAMAS".

Author: Coral Cossío Abascal.

Directors: Jaime Carpio García y Jorge Rodríguez Hernández.

Degree: Grado en Ingeniería Civil, Mención en Construcciones Civiles.

Keywords: refuerzo, geosintético, SUDS, firme permeable, asientos.

AIMS

The purpose of this TFG is to analyse the reinforcement of permeable pavements with geosynthetics, studying the practical case of the experimental car park in "Las Llamas". The structure of the study is, therefore, that of a Study of Alternatives, with an introductory part about geosynthetics and a second part detailing the problems and possible solutions for the practical case of the car park of permeable pavements in Las Llamas.

The particular objectives are to review the characteristics of the geosynthetics; to analyse their application in road reinforcements; to diagnose the condition of the practical case; to propose the alternatives and to select and discuss the final proposal.

It should be noted that, although the main issue is the use of geosynthetics in pavement reinforcement, all viable alternatives have been evaluated, including those that do not include these materials in their solution.

GEOSYNTHETICS

There is a wide range of applications for these materials in civil works, from the simple separation and filtering of any layer, allowing drainage in embankments, to the containment of fluids in waterproofing, through reinforcement and erosion control. This is due to the versatility of a polymeric material that can be available in the form of sheets, meshes, fabrics and even three-dimensional tubes and cells.

However, as with all novelty products, there is not a great deal of experience of their behaviour both in laboratory and on site, so technical regulations do not always reflect their use.

DESIGN METHODOLOGY FOR WOVEN GEOTEXTILE OR GEOGRID

Due to the need of reinforcement, the use of non-woven geosynthetics with low tensile strength and impermeable membranes that make drainage impossible can be ruled out.

The alternatives that are considered are those of woven geotextiles and geogrids, given that the spacing between their fibers allows the filtration of water, and their characteristics allow them greater load capacities than nonwovens.

This type of geosynthetics is placed at the level of the present ones, between the sub-base and the base, but they will have to be anchored to assure the tension that guarantees a good opposition against the weight of the vehicle and the intermediate layers.

In spite of the existence of calculation methods for the reinforcement of roads with these materials, none of them is applicable to a car park of the described characteristics. This is due to the particulars of the loads, which remain static most of the time unlike roads, and to the characteristics of some permeable pavements such as cobblestones, which transmit the loads to the lower layers in an almost punctual manner.

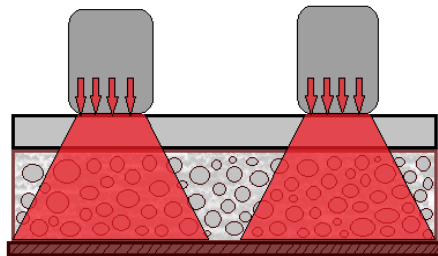


Illustration 1. Pyramidal load distribution. ❌

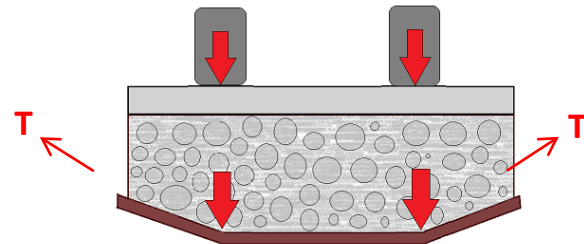


Illustration 2. Deformation under point load ✅

Based on these characteristics, we have developed our own production method based on the tension that the geotextile or geogrid will have to withstand in order to avoid differential seating greater than an adequate limit. It should be borne in mind that the supported traction is largely affected by the creep of these materials.

The results for loads belonging to light traffic parking and differential seats less than 1.5 mm are such high stresses with low creep that the use of these materials is ruled out, unless ad hoc materials are used.

DESIGN METHODOLOGY FOR GEOCELLS

The use of reinforced geocells, on the other hand, entails a different study since their placement and operation present important differences. This reinforcement is not based on the tensile strength of the geosynthetics (so it should not be anchored at its ends) but bases its road reinforcement capacity on the compression they can withstand in the direction perpendicular to their placement plane, so the calculation for its design is significantly simpler, coinciding with the compression weight above the geocell.

In the same way as in the previous methodology, a punctual transmission of loads on pavements such as paving stones or cells is considered. These geocells withstand very high compressions and are therefore suitable for the practical case.

CASE STUDY APPLICATION

The Las Llamas experimental car park consists of 45 monitored parking spaces, with different types of permeable pavements: two different types of pavers, draining bituminous mix, porous concrete, concrete cells and plastic cells. Of all of them, the differential seats are most noticeable in the paved squares, so the reinforcement will focus on these and extrapolate to the others if necessary.

- ❖ **ALTERNATIVE ZERO: NO ACTION OR FILLING WITH PUMPING.** Despite the reduced cost of refilling with granular material, this alternative has been ruled out as it is not a reinforcement solution in itself.
- ❖ **ALTERNATIVE ONE: GEOSYNTHETICS.** Although the use of geotextiles or geogrids is not viable due to the stress to be supported and the high price of ad hoc materials, the alternative is to use reinforcement geocells.
- ❖ **ALTERNATIVE TWO: POROUS CONCRETE.** The mechanical and draining characteristics of this material make it an option to be taken into account for reinforcement, as a lower layer.

CONCLUSIONS AND FINAL PROPOSAL:

Once it was determined that both porous concrete alternative and reinforcement geocells have the necessary requirements to avoid differential seating while maintaining permeability, the decision was made on the basis of cost. Permeable concrete is more expensive, due to the machinery and labor required for such a small action, so the final proposal is to use geocells that confine part of the sub-base, providing great resistance to compression.

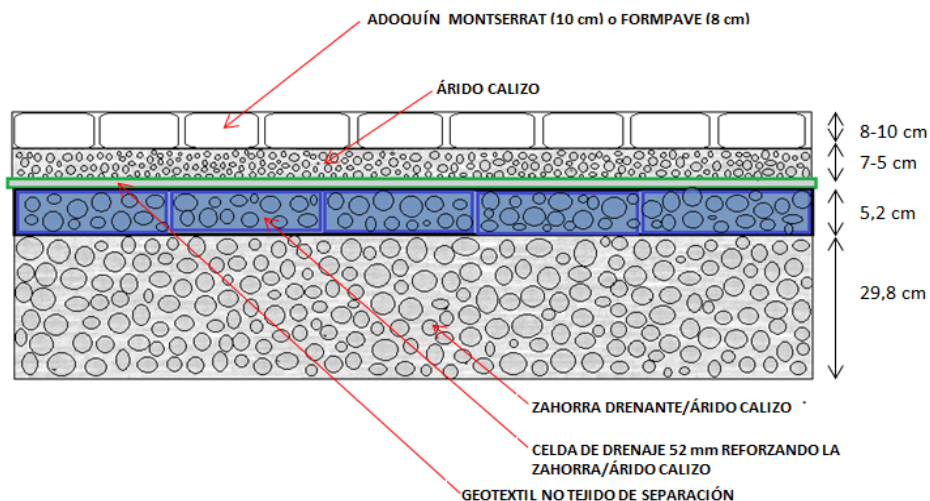


Illustration 4. Final section of the proposal, paved surface.

The final solution proposed cannot be generalised to the reinforcement of roads due to the particular loads and permeability required in the particular case studied of a car park with permeable pavements. It should also be noted that the position of the geocell as a reinforced base is an original contribution tested in this study in a theoretical manner, and it is recommended to validate it in a pilot section before its general application.

As a final general conclusion, it should be pointed out that geosynthetics (including geocells) have a very high potential for future development, although greater technical knowledge is needed to generalize their application in the sector, and the same can be said about permeable pavements, whose advantages outweigh their disadvantages, although there is still a barrier of technical ignorance that is fortunately being overcome.

